

Grado en Ingeniería mecánica

Curso 2019-2020

Trabajo de fin de grado

Optimización de un receptor tipo tubo bayoneta

Antonio Ortiz Escaño

Tutor: Rafael Pérez Álvarez

Leganés, 2020



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Optimización de un receptor tipo tubo bayoneta

Autor: Antonio Ortiz Escaño

Tutor: Rafael Pérez Álvarez

EL TRIBUNAL

Presidente: Fernández Galisteo, Daniel

Secretario: Oña Simbaña, Edwin Daniel

Vocal: Domingo Guijarro, Jerónimo

Por duro que sea, por difícil que parezca

No ceses en ello, sigue luchando

a pesar de la adversidad

Demuéstrate de que eres capaz

y házselo saber al mundo.

RESUMEN

El cambio climático, la sobreexplotación de los recursos naturales y por ende, la cada vez mayor escasez de estos ha provocado que durante varios lustros se esté investigando y desarrollando nuevos métodos de energía alternativa y limpia. La energía solar es una de las energías renovables que se encuentra en auge y que mayores beneficios puede aportar, ya que, el Sol es un recurso ilimitado capaz de generar grandes cantidades de energía siempre y cuando se consiga aprovechar de manera eficiente.

Uno de los métodos desarrollados para obtener energía a partir de la gigante roja son las denominadas Centrales Solares de Tipo Torre. En ellas, la disposición de una gran cantidad de paneles solares permiten concentrar la radiación proveniente del Sol en un único punto, para que de esta manera, poder generar grandes cantidades de energía la cual es utilizada para producir electricidad. No obstante, el receptor solar de este tipo de centrales está expuesto a temperaturas muy elevadas por lo que suelen producirse roturas en los materiales de trabajo, además, debido al sistema de refrigeración que utilizan, haciendo uso de fluidos que deben ser capaces de trabajar a esas temperaturas, son muy habituales los problemas debido a efectos de corrosión.

Por medio de CFD se analizan diversos modelos de capuchones, los cuales se encargan de la recirculación del fluido en los límites de los tubos, para conocer el comportamiento que tienen distintos fluidos refrigerantes. A su vez también se estudia la influencia de que exista una excentricidad entre el tubo interior y el tubo anular. Para poder comparar todos los modelos realizados se va a utilizar un código de Matlab que permite graficar los resultados para una mejor interpretación de los resultados.

Tras ser analizados cerca de doscientos casos distintos se comprueba que a excepción del fluido LBE, el resto de los fluidos presentan un comportamiento similar, generando menores pérdidas de carga el sodio, además aumentar el valor de excentricidad y la separación de los capuchones con respecto la zona tubular, la pérdida de carga también presenta valores inferiores.

Los capuchones con forma semicircular y forma con una bifurcación unido a una separación adicional son los que presentan los valores más favorables para su utilización.

Palabras clave: Energía solar, Central Termosolar Tipo Torre, Tubo Bayoneta, Análisis, Simulación, Capuchón, Fluido, Pérdida De Carga.

ABSTRACT

Global warming, the natural resources overexploitation and therefore its reduction over the years are the main facts that for several decades new developments and researches of alternative and clean energy methods is being investigated. Solar energy is one of the renewable energies that is booming and can bring greater benefits, due to an unlimited resource capable of generate huge amounts of energy if it's used properly called the Sun.

One of the developed methods to obtain energy from the Red Giant are the Solar Power Towers. In them, the arrangement of a huge number of heliostats allow to concentrate the radiation from the Sun into a single point generating thermal energy used to produce electricity. However, the solar receiver of this type of Power Towers is exposed to a very high temperature levels, which tends to develop breakages through materials, in addition, due to the cooling system which provides this Power Plants, using fluids that are able to work at these temperatures, corrosion effects can be a very common problem.

A diversity of cap models are analyzed using CFD, which are the main factor to produce the recirculation of the fluid at the limit of the tubes, just to know the behavior of different cooling fluids. The influence of eccentricity between the inner tube and the annular tube is also studied. In order to compare all the models and factors studied a Matlab code is going to be used to graph the results to compare them in a better way.

After being analyzed about two hundred different cases, it is verified that the fluids have a similar behavior with the exception of the LBE fluid, obtaining greater results using sodium with lower head losses, also increasing the eccentricity factor and the separation between the cap and the tubes can generate lower head losses.

The hoods with a semicircular and a fork attached to an additional separation form are those that generate the most favorable values for their use.

Keywords: Solar Energy, Solar Power Tower, Bayonet Tube, Analysis, Simulation, Cap, Fluid, Head Loss.

INDICE

<i>CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN</i>	<i>1</i>
1.1. Motivación del proyecto	1
1.2. Energías Renovables. Energía Solar	2
1.2.1. Energía eólica	3
1.2.2. Energía hidráulica	4
1.2.3. Energía geotérmica	5
1.2.4. Energía solar	6
Colectores cilindro parabólicos	9
Disco Stirling	10
Colectores Fresnel	10
1.3. Central termosolar tipo torre	11
1.3.1. Funcionamiento	11
1.4. Objetivos del proyecto	16
1.5. Estructura del proyecto	17
<i>CAPÍTULO II RECEPTORES TERMOSOLARES</i>	<i>19</i>
2.1. Problemas de los receptores solares convencionales	19
2.2. Alternativas en el diseño de los tubos	20
2.3. Fluidos de trabajo	21
2.3.1. Propiedades del agua	22
2.3.2. Propiedades de la sal solar	22
2.3.3. Propiedades del sodio líquido	23
2.3.4. Propiedades del LBE	24
<i>CAPÍTULO III DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA</i>	<i>26</i>
3.1. Descripción del sistema	26
<i>CAPÍTULO IV SIMULACIÓN BIDIMENSIONAL CFD</i>	<i>30</i>
4.1. Geometría	30
4.1.1. Geometría de los tubos	30
Tipos de excentricidades	30
4.1.2. Geometría de los capuchones	33
4.2. Etapa de mallado	35
4.2.1. Mallado de los tubos	35
4.2.2. Mallado de los capuchones	36
4.3. Etapa de simulación	38
4.3.1. Análisis de sensibilidad	39

4.3.2. Flujo laminar y flujo turbulento	40
4.4. Características simulación CFD	44
4.5. Casos estudiados.....	48
<i>CAPÍTULO V RESULTADOS</i>	49
5.1. Validación previa de los resultados.....	49
ΔP circular.....	50
ΔP anular.....	51
5.2. Estudio de la pérdida de carga en función del tipo de capuchón	54
5.3. Estudio de la pérdida de carga en función de la excentricidad	55
5.4. Estudio de la pérdida de carga en función del fluido de trabajo.....	56
5.5. Casos adicionales	57
<i>CAPÍTULO VI PRESUPUESTO DEL PROYECTO</i>	59
6.1. Costos directos.....	59
6.2. Costos indirectos.....	59
<i>CAPÍTULO VII PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO</i>	61
<i>CAPÍTULO VIII CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS</i>	63
7.1. Conclusiones	63
7.2. Trabajos futuros.....	64
<i>CAPÍTULO IX BIBLIOGRAFÍA</i>	65
<i>ANEXOS</i>	70
Anexo I: Valores obtenidos del diseño inicial.....	70
Anexo II: Análisis comparativo de los modelos turbulentos	71
Reynold stress model.....	71
k- ω	73
K-epsilon	75
Anexo III: Diagrama de Moody	78
Anexo IV: Código Matlab.....	79
Anexo V Comprobación de la correcta resolución del código Matlab.....	89
Anexo VI Código Matlab para la obtención de las gráficas de resultados	93

TABLA DE ILUSTRACIONES

Fig. 1: Principales fuentes de energía del mundo [1].....	1
Fig. 2: Demanda energética 2018-2040 [3].	2
Fig. 3: Promedio de calentamiento (°C) para 2100 [4].....	2
Fig. 4: Parque eólico marino del puerto de Bilbao [10].	3
Fig. 5: Potencia eólica instalada en España [11].	4
Fig. 6: Presa para la generación de energía hidráulica [12].....	4
Fig. 7: Potencia hidráulica instalada en España [13].....	5
Fig. 8: Complejo Geotérmico Larderello-Italia [14].....	5
Fig. 9: Ranking de países con mayor energía geotérmica instalada en 2018 [16].....	6
Fig. 10: Demanda energética 2050 [17].....	6
Fig. 11: Niveles de irradiación directa normal en Europa 2020 [18].....	7
Fig. 12: Panel Solar Fotovoltaico [21].....	8
Fig. 13: Colector solar [22].....	8
Fig. 14: Colector solar de baja temperatura [24].	9
Fig. 15: Colector solar cilindro parabólico de media temperatura [25].....	9
Fig. 16: Central termosolar tipo torre de alta temperatura [26].....	9
Fig. 17: Esquema funcionamiento de un colector cilindro parabólico [27].....	9
Fig. 18: Tubo de un colector cilindro parabólico [29].....	9
Fig. 19: Disco Stirling [31], [32].....	10
Fig. 20: Colectores Fresnel [34], [35].	11
Fig. 21: Colector Fresnel con varias torres [28].....	11
Fig. 22: Componentes que conforman una instalación de tipo torre central de dos circuitos [36].	12
Fig. 23: Diseño de un campo de heliostatos tipo Circular (izquierda) y tipo Norte (derecha [41]).	13
Fig. 24: Posibles problemas de los heliostatos [42].....	13
Fig. 25: Central termosolar PS10 con receptor de cavidad [44].	14
Fig. 26: Detalle de un receptor de cavidad [45].....	14
Fig. 27: Central termosolar Gemasolar con receptor externo cilíndrico [46].	14
Fig. 28: Tanques de almacenamiento [47].	15
Fig. 29: Esquema de funcionamiento de una central termosolar de tipo torre con dos circuitos y receptor de cavidad [48].	16
Fig. 30: Receptor cilíndrico externo de 18 paneles (9+9) [50].....	19
Fig. 31: a) Planta termosolar Gemasolar, b) Problemas de corrosión en un tubo, c) Imagen microscópica de un recubrimiento protector sobre un acero ferrítico [51].....	20
Fig. 32: Representación axilsimétrica de un modelo ‘Tadpole’ en 2D [52].....	20
Fig. 33: a) Representación esquemática de un panel formado por tubos bayoneta, b) Representación de un tubo bayoneta con excentricidad [53].....	21
Fig. 34: Esquema del diseño del receptor tubo bayoneta para un capuchón plano genérico 26	26
Fig. 35: Contorno de velocidades (a) y presiones (b) para el diseño inicial.	28
Fig. 36: Esquema final del diseño del receptor tubo bayoneta para un capuchón plano genérico 29	29
Fig. 37: Contorno de velocidades y presiones para el diseño final.	29
Fig. 38: Diseño 3D de los modelos de tubos; 1-Tubos con $\xi=0$ (concéntricos), 2-Tubos con $\xi=0.25$, 3-Tubos con $\xi=0.4$	30
Fig. 39: Representación frontal en 2D de los modelos de tubos; 1-Tubos con $\xi=0$ (concéntricos), 2-Tubos con $\xi=0.25$, 3-Tubos con $\xi=0.4$	31
Fig. 40: Origen de coordenadas como punto inicial para el diseño del tubo.	31
Fig. 41: Origen de coordenadas como punto inicial para el diseño del tubo.	32
Fig. 42: Origen de coordenadas como punto inicial para el diseño del tubo.	32
Fig. 43: Origen de coordenadas como punto inicial para el diseño del tubo.	32

Fig. 44: Diseño de un tubo con capuchón semicircular, con separación igual a 22.3mm y excentricidad igual a 0.....	33
Fig. 45: Diseño de un tubo con capuchón con bifurcación, con separación igual a 5.6mm y excentricidad igual a 0.4.....	33
Fig. 46: Diseño 3D de los modelos de capuchones; 1-Capuchón plano, 2-Capuchón semicircular, 3-Capuchón con bifurcación, 4-Capuchón con bifurcación más separación.....	33
Fig. 47: Diseño 2D de los modelos de capuchones; 1-Capuchón plano, 2-Capuchón semicircular, 3-Capuchón con bifurcación, 4-Capuchón con bifurcación más separación.....	34
Fig. 48: Mallado del tubo en la zona más próxima al capuchón.	36
Fig. 49: Mallado del tubo en la zona más alejada del capuchón.....	36
Fig. 50: Diseño y mallado de un tubo con cúpula plana (Excentricidad 0.4; Separación=5.6mm).	36
Fig. 51: Diseño y mallado de un tubo con cúpula semicircular (Excentricidad 0.25; Separación=16.8mm).	37
Fig. 52: Diseño y mallado de un tubo con capuchón con bifurcación (Excentricidad 0; Separación=22.3mm).	38
Fig. 53: Diseño y mallado de un tubo con capuchón con bifurcación (Excentricidad 0.25; Separación=11.2mm).	38
Fig. 54: Ejemplo de mallado del método resolutivo en función del número de elementos.	39
Fig. 55: Análisis de sensibilidad para la estabilización del valor de velocidad en un modelo de capuchón plano.....	40
Fig. 56: Diagrama de barras comparativo entre los valores de estudio para distintos modelos turbulentos.....	44
Fig. 57: Mallado (a.1), contorno de velocidades m/s (a.2) y contorno de presiones Pa (a.3) de un modelo 3D. Mallado (b.1), contorno de velocidades m/s (b.2) y contorno de presiones Pa (b.3) de un modelo plano 2D. Mallado (c.1), contorno de velocidades m/s (c.2) y contorno de presiones Pa (c.3) de un modelo 2D con un eje de axilsimetría.	45
Fig. 58: Composición de las zonas de un tubo bayoneta 1 (Excentricidad 0.4).	47
Fig. 59: Composición de las zonas de un tubo bayoneta 2 (Excentricidad 0.4).	47
Fig. 60: Esquema resumen de los diferentes modelos analizados.	48
Fig. 61: Gráfico de residuos generados para una simulación con modelo turbulento Reynolds Stress. ...	49
Fig. 62: Estabilización del valor de velocidad a la salida del tubo.	49
Fig. 63: Zona circular.....	50
Fig. 64: Zona anular.....	50
Fig. 65: Zona codo (Capuchón).	50
Fig. 66: Valor de la pérdida de carga para un capuchón plano y una separación de 5.6mm. (a) Pérdida de carga en el capuchón. (b) Pérdida de carga total en el tubo.	53
Fig. 67: Valor de la pérdida de carga para un capuchón con bifurcación y una separación de 16.8mm. (a) Pérdida de carga en el capuchón. (b) Pérdida de carga total en el tubo.	53
Fig. 68: Contornos de velocidades para distintos modelos de capuchón utilizando sal solar como fluido de trabajo $\xi=0$. Sep. 11.2mm.(a) Capuchón plano; (b) Capuchón semicircular; (c) Capuchón con bifurcación; (d) Capuchón con bifurcación y separación adicional.	54
Fig. 69: Pérdida de carga en función del tipo de capuchón. Fluido de trabajo agua $\xi=0$. (a) Pérdida de carga en el capuchón. (b) Pérdida de carga total en el tubo.	54
Fig. 70: Pérdida de carga en el capuchón (codo) en función del valor de excentricidad. Fluido de trabajo agua. (a) Capuchón plano. (b) Capuchón semicircular.	55
Fig. 71: Pérdida de carga en el tubo en función del valor de excentricidad. Fluido de trabajo agua. (a) Capuchón plano. (b) Capuchón semicircular.	55
Fig. 72: Contorno de velocidad axial en función de la excentricidad del tubo utilizando como fluido Sal Solar [53].	56
Fig. 73: Contorno de velocidades en un capuchón semicircular en función de la excentricidad utilizando como fluido Agua.....	56

Fig. 74: Pérdida de carga en el capuchón (codo) en función del fluido de trabajo para una $\xi=0$. (a) Capuchón plano. (b) Capuchón con bifurcación y separación.	57
Fig. 75: Pérdida de carga en el tubo en función del fluido de trabajo para una $\xi=0$. (a) Capuchón plano. (b) Capuchón con bifurcación y separación.	57
Fig. 76: Pérdida de carga para un mayor número de separaciones. (a) Todas las separaciones analizadas. (b) Zoom a las separaciones más grandes.	58
Fig. 77: Contornos de velocidades para distintas separaciones y un capuchón con bifurcación y separación. Fluido de trabajo Sal solar(a) Sep. 0.5mm; (b) Sep. 11.2mm; (c) Sep. 22.3mm; (d) Sep. 100mm.	58
Fig. 78: Diagrama de Gantt.....	62
Fig. 79: Contorno de velocidades obtenido para un capuchón semicircular en el diseño inicial.	70
Fig. 80: Contorno de presiones obtenido para un capuchón semicircular en el diseño inicial.....	70
Fig. 81: Tabla de valores promedio de la presión y velocidad para un modelo inicial de capuchón semicircular.....	71
Fig. 82: Gráfico de la estabilización del valor de velocidad a la salida del tubo para el modelo turbulento Reynold Stress Model.....	71
Fig. 83: Gráfico de la estabilización del valor de velocidad a la salida del tubo para un mayor número de elementos en el mallado para el modelo turbulento Reynold Stress Model.	72
Fig. 84: Valores de los datos utilizados para resolver el modelo turbulento Reynolds Stress Model en función del número de iteraciones.....	72
Fig. 85: Valores de los datos utilizados para resolver el modelo turbulento Reynolds Stress Model para un mayor número de elementos en función del número de iteraciones.	73
Fig. 86: Gráfico de la estabilización del valor de velocidad a la salida del tubo para el modelo turbulento k- ω	73
Fig. 87: Gráfico de la estabilización del valor de velocidad a la salida del tubo para un mayor número de elementos en el mallado para el modelo turbulento k- ω	74
Fig. 88: Valores de los datos utilizados para resolver el modelo turbulento k- ω en función del número de iteraciones.	74
Fig. 89: Valores de los datos utilizados para resolver el modelo turbulento k- ω para un mayor número de elementos en función del número de iteraciones.	75
Fig. 90: Gráfico de la estabilización del valor de velocidad a la salida del tubo para el modelo turbulento k- ϵ	75
Fig. 91: Gráfico de la estabilización del valor de velocidad a la salida del tubo para un mayor número de elementos en el mallado para el modelo turbulento k- ϵ	76
Fig. 92: Valores de los datos utilizados para resolver el modelo turbulento k- ϵ en función del número de iteraciones.	76
Fig. 93: Valores de los datos utilizados para resolver el modelo turbulento k- ϵ para un mayor número de elementos en función del número de iteraciones.	77
Fig. 94: Diagrama de Moody.....	78
Fig. 95: Comprobación de la obtención de datos para un capuchón plano de Excentricidad 0 y separación 5.6mm.	90
Fig. 96: Comprobación de la obtención de datos para un capuchón con bifurcación de Excentricidad 0.4 y separación 22.3mm.....	90
Fig. 97: Comprobación más detallada de la obtención de datos para un capuchón con bifurcación de Excentricidad 0.4 y separación 22.3mm.	91
Fig. 98: Comprobación de la división de zonas para un capuchón semicircular de Excentricidad 0 y separación 16.8mm.	91
Fig. 99: Comprobación de la división de zonas para un capuchón semicircular de Excentricidad 0.25 y separación 16.8mm.	92
Fig. 100: Comprobación de la división de zonas para un capuchón semicircular de Excentricidad 0.4 y separación 16.8mm.	92

INDICE DE TABLAS

<i>TABLA 1: PROPIEDADES DE LOS DIFERENTES FLUIDOS.....</i>	<i>25</i>
<i>TABLA 2: PARÁMETROS DEL DISEÑO INICIAL.....</i>	<i>26</i>
<i>TABLA 3: PARÁMETROS DEL DISEÑO FINAL.....</i>	<i>29</i>
<i>TABLA 4: RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE ANSYS FLUENT DE LOS DISTINTOS TIPOS DE FLUJOS TURBULENTOS.....</i>	<i>43</i>
<i>TABLA 5: TABLA RESUMEN DE LOS DIFERENTES MODELOS ANALIZADOS. ...</i>	<i>48</i>
<i>TABLA 6: TABLA DE COSTOS ANUAL.</i>	<i>60</i>
<i>TABLA 7: FASES DEL PROYECTO Y DÍAS NECESARIOS.....</i>	<i>61</i>

NOMENCLATURA

CFD	Fluidodinámica computacional
HTF	Fluido de trabajo
MEF	Método de elementos finitos
Y*	Distancia desde la pared adimensionalizada
Y+	Función de pared
L	Longitud del tubo (m)
E	Separación entre tubos (mm)
ξ	Excentricidad (-)
D	Diámetro (mm)
de	Diámetro exterior del tubo circular (m)
di	Diámetro interior del tubo circular (m)
De	Diámetro exterior del tubo anular (m)
Di	Diámetro interior del tubo anular (m)
z	Espesor de pared (m)
A	Área (m^2)
RA	Relación de áreas (-)
K	Conductividad térmica ($W/m * K$)
μ	Viscosidad dinámica (Pa*s)
ρ	Densidad (kg/m^3)
Cp	Calor específico ($J/kg * K$)
\dot{m}	Flujo másico (kg/s)
v	Velocidad del fluido (m/s)
u_T	Velocidad de fricción en la zona cercana a la pared (m/s)

ν	Viscosidad cinemática (m^2/s)
λ	Factor de fricción (-)
k	Pérdidas secundarias (-)
Re	Número de Reynolds (-)
ε	Rugosidad absoluta (m)

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

CHAPTER I INTRODUCTION

1.1. Motivación del proyecto

Ya es un hecho, el planeta se muere y gran parte de este problema comienza a partir de la revolución industrial, un gran aporte a este mundo que, debido a su uso incontrolado, deriva en la situación que se está viviendo actualmente y que, pudiera agravarse a lo largo de las próximas décadas si no se pone remedio desde ya.

El siguiente gráfico muestra el uso de las principales fuentes de energía a nivel mundial.

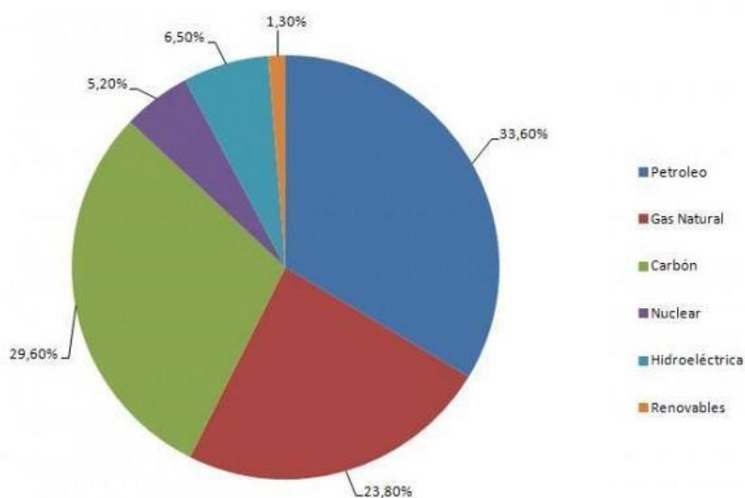


Fig. 1: Principales fuentes de energía del mundo [1].

En él puede apreciarse como el uso de los combustibles fósiles predominan notablemente sobre el resto de alternativas, siendo las energías renovables las menos utilizadas. Esto significa que, aproximadamente el 80% de la energía producida es a partir de métodos o fuentes contaminantes.

Los combustibles fósiles son y han sido la principal fuente de energía en el planeta, esto se debe a la gran cantidad disponible convirtiéndose en combustibles baratos y fáciles de obtener. Sin embargo, son los responsables de los gases de efecto invernadero, la contaminación, y por ende, la destrucción del planeta. Además, cabe destacar que estos combustibles fósiles no son ilimitados, ya que, para que se generen estos han de pasar miles de años. Para hacerse una idea “en un año, el ser humano es capaz de consumir lo que la naturaleza ha tardado un millón de años en producir”, esto quiere decir, que de seguir a este ritmo se podrían acabar las reservas de petróleo, por ejemplo, en apenas 100 años [2].

Pese a ello y según un estudio elaborado por la empresa Wood Mackenzie, dedicada a la investigación y consultoría en temas energéticos, predice que la utilización de fuentes de energía no va a variar con el transcurso de los próximos años.

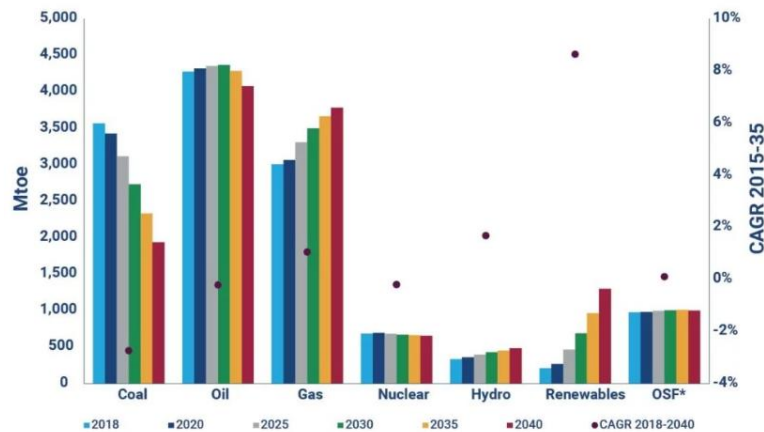


Fig. 2: Demanda energética 2018-2040 [3].

Este hecho provoca que el cambio climático se convierta en la causa de la extinción de la raza humana, ya que, el aumento de la temperatura del planeta traerá consecuencias catastróficas para este, las cuales comienzan a apreciarse actualmente.

De seguir así el aumento de la temperatura media en la tierra en el próximo siglo puede aumentar de la siguiente manera.

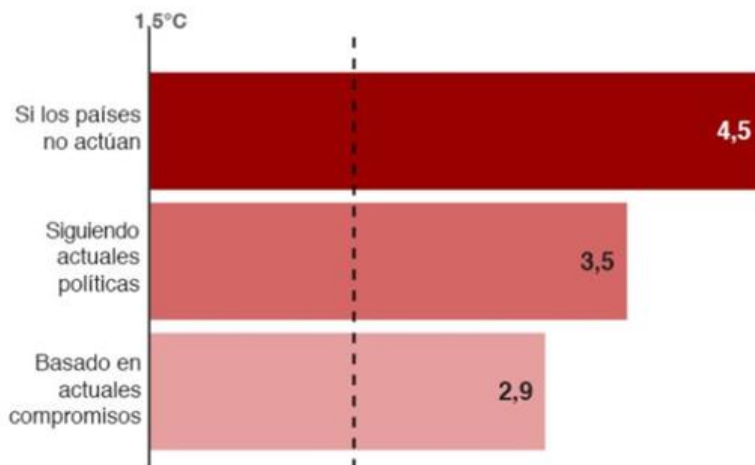


Fig. 3: Promedio de calentamiento (°C) para 2100 [4].

Para hacerse una idea de lo que esto supone, aumentar la temperatura media del planeta de 1.5°C a 2°C traería consigo el deshielo del Ártico, el aumento del nivel del mar en 6 centímetros, el aumento de la población expuesta a nivel extremos de calor y la desaparición de una gran cantidad de especies y plantas entre otras cosas [5].

1.2. Energías Renovables. Energía Solar

Pese a la adversidad aún se puede paliar esta situación y tratar de revertir el daño causado, para ello es preciso entre otras cosas utilizar otras fuentes de energía alternativas, las energías renovables.

La energía renovable es aquella fuente de energía que proviene de los recursos naturales, sol, viento o agua entre otros, en lugar de los combustibles fósiles, por ello, son considerados recursos ilimitados. Considerada como la energía del futuro, la energía renovable posee diversidad de puntos positivos frente a las utilizadas actualmente, entre ellos se pueden destacar [6], [7]:

- Son beneficiosas para el medio ambiente: No generan residuos y no es necesaria la destrucción terrestre para su obtención.
- Son recursos ilimitados.
- Evitan la dependencia de países extranjeros a la hora de obtener energía.
- Generan mayores puestos de trabajo que las energías convencionales.

Pero este tipo de energías también presentan sus desventajas.

- No son fuentes constantes de energía: tienen que darse unas condiciones óptimas, generalmente climáticas, que permitan su uso.
- Diversidad geográfica de los recursos: Dependiendo de la zona en la que se viva predominan unos recursos naturales frente a otros.
- El costo para la utilización de este tipo de energías es muy elevado, por lo que no son alternativas viables económicamente.

Existen diversos tipos de energías alternativas, ya que, los recursos naturales que pueden ser aprovechados también son variados. Entre todas ellas las más desarrolladas y utilizadas son las siguientes:

1.2.1. Energía eólica

La energía eólica es aquella que aprovecha las corrientes de aire para generar energía eléctrica. Este tipo de energía se genera a través de las aspas de una gran cantidad de molinos de viento, ya que, el efecto del viento hacen que las aspas al moverse accionen un generador eléctrico convirtiendo la energía de rotación en energía eléctrica.

Dentro de este tipo de energía destaca la energía eólica marina, cada vez más en auge, ya que las corrientes de aire en zonas marianas son más constantes y su frecuencia mayor. En este tipo de energías uno de los inconvenientes que existen es el continuo paso de aves [6], [8], [9].



Fig. 4: Parque eólico marino del puerto de Bilbao [10].

La energía eólica presenta una serie de desventajas:

- La presencia de viento no es segura.
- La velocidad del viento tiene que ser limitada.
- Los parques eólicos ocupan grandes superficies.

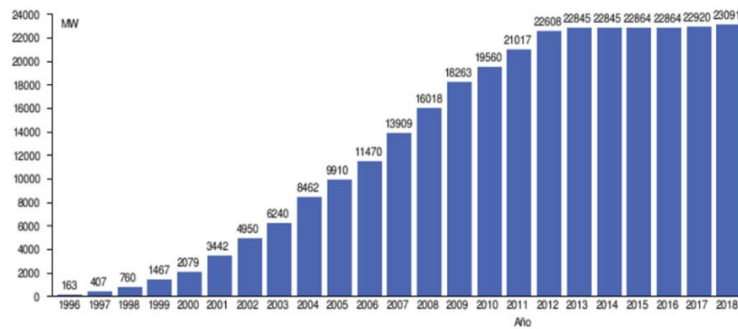


Fig. 5: Potencia eólica instalada en España [11].

1.2.2. Energía hidráulica

Por medio de la fuerza que es capaz de generar el agua esta consigue ser transformada en energía eléctrica.

El agua se almacena en presas las cuales están formadas por bobinas que al girar se produce energía eléctrica. Las presas tienen una serie de compuertas que se abren permitiendo el paso del agua, este cae en forma de cascada sobre las bobinas, y la fuerza generada provoca el movimiento de las bobinas y por ende, la obtención de energía [6], [12].



Fig. 6: Presa para la generación de energía hidráulica [12].

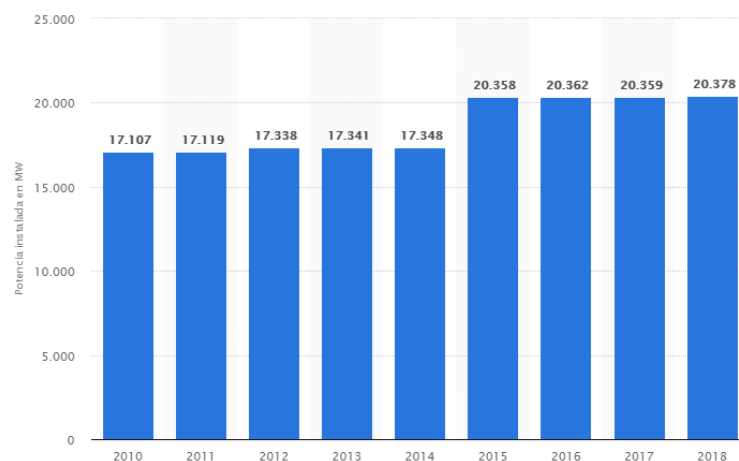


Fig. 7: Potencia hidráulica instalada en España [13].

1.2.3. Energía geotérmica

Aprovecha el calor procedente de las zonas internas de la corteza terrestre para aplicaciones de climatización/refrigeración como para la obtención de agua caliente sanitaria.

Este tipo de energía, a diferencia de otro tipo de energías renovables no depende de las condiciones climáticas sino que hace uso de las elevadas temperaturas que hay en el interior de la Tierra.

Las zonas que se encuentran a una temperatura inferior a 90°C son utilizadas para la obtención de agua caliente sanitaria y para climatizaciones de edificios. En cambio las zonas cuya temperatura se encuentra entre 90-150°C puede ser aprovechada para la obtención de electricidad.



Fig. 8: Complejo Geotérmico Larderello-Italia [14].

Algunas de las ventajas que tienen este tipo de instalaciones son:

- Bajo coste de mantenimiento.

- Vida útil elevada.
- Ocupan poco espacio.

Sin embargo, este tipo de energías tienen la problemática de que dependen de las condiciones del suelo donde se quiera realizar la instalación, además el riesgo de fugas puede traer consigo la expulsión de ácidos muy perjudiciales para el ser humano y el medio ambiente. Es por estos motivos por los que el desarrollo de este tipo de energía es escaso o nulo [15], [14].

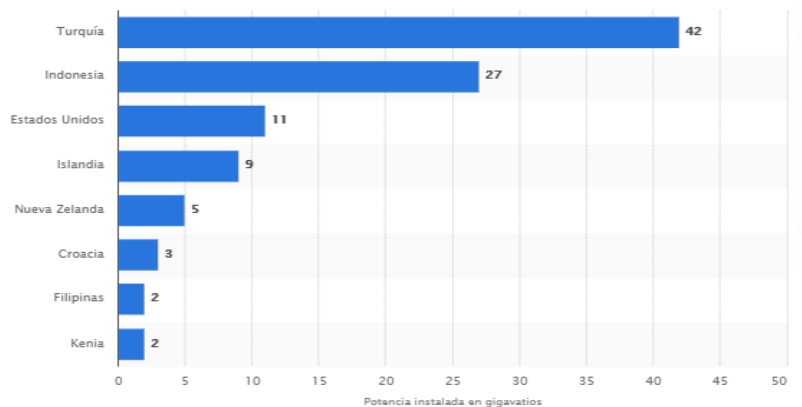


Fig. 9: Ranking de países con mayor energía geotérmica instalada en 2018 [16].

1.2.4. Energía solar

Basada en el aprovechamiento de la energía proveniente del Sol. La estrella roja que se encuentra en el Sistema Solar es un recurso inagotable de energía que emite radiación solar de manera constante. Se estima que la energía que radia el Sol sobre la tierra es diez mil veces mayor que la que se consume en todo el planeta, y al tratarse de una estrella, esta será cada vez mayor a medida que aumente el tamaño de este.

El siguiente gráfico muestra la previsión para el año 2050 del uso de energías, en el cual se puede apreciar un cuantioso incremento en el uso de energía solar, debido principalmente al aumento progresivo de la radiación solar.

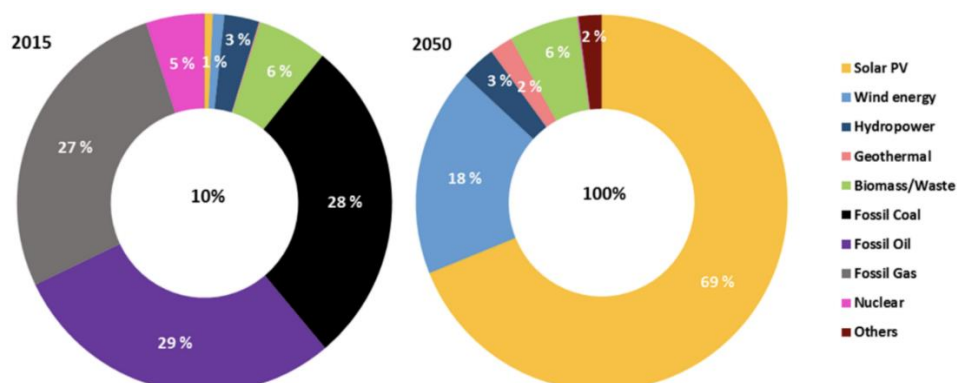


Fig. 10: Demanda energética 2050 [17].

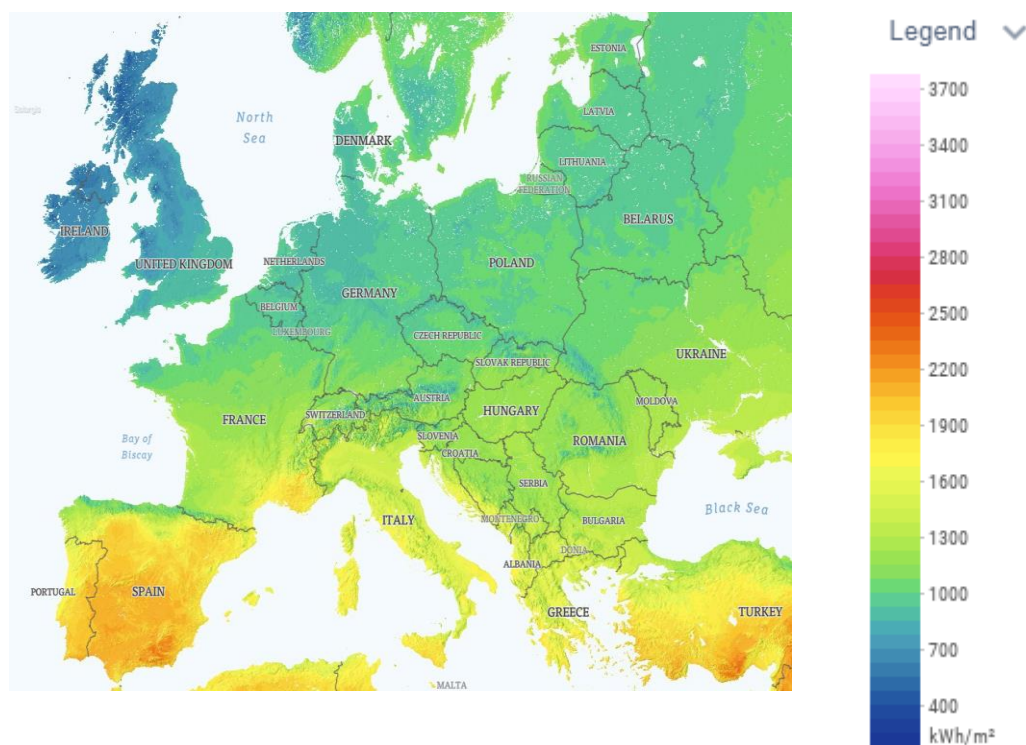


Fig. 11: Niveles de irradiación directa normal en Europa 2020 [18].

Para el aprovechamiento de este tipo de energía se utilizan paneles solares que pueden ser de distinto tipo, en función del método utilizado para ello [19]:

- Energía solar pasiva.
- Energía solar fotovoltaica.
- Energía solar térmica.

Energía solar pasiva

Basada en el principio básico de aprovechamiento de la radiación solar sin hacer uso de ningún tipo de dispositivo. Para ello simplemente es necesario hacer un buen uso de los materiales utilizados (propiedades basadas en la conductividad térmica) y ubicar los edificios de acuerdo a las condiciones más óptimas a la radiación solar.

Energía solar fotovoltaica

Basado en el efecto fotovoltaico que consiste en transformar la luz solar en corriente continua por medio de paneles solares y convertirla en corriente alterna para producir electricidad. Para ello, los paneles solares están fabricados por una célula de silicio, este material al unirse con fósforo genera material con carga negativa y al unirse con boro genera carga positiva, ambas capas creadas se encuentran divididas para mantenerse como neutras. Cuando estos paneles reciben energía solar, los fotones provocan que los electrones de la capa con carga negativa se conviertan en conductores generando un campo eléctrico. Al conectarse ambas capas se crea un circuito de corriente la cual es aprovechada [20].



Fig. 12: Panel Solar Fotovoltaico [21].

Energía solar térmica

Buscan utilizar la energía térmica generada por la radiación solar por medio del aumento de la energía térmica de un fluido de transporte, para ello se hace uso de receptores solares que son los encargados de aumentar la temperatura del fluido captando la energía térmica.



Fig. 13: Colector solar [22].

Los receptores solares pueden dividirse en tres tipos según la temperatura de trabajo [19], [23]

- **Receptores de baja temperatura:** Utilizados para temperaturas inferiores a 65°C , su aplicación generalmente se limita al ámbito doméstico. Fig. 1.14.
- **Receptores de media temperatura:** Generalmente trabajan en un rango de $100\text{--}300^{\circ}\text{C}$, son capaces de concentrar radiación para entregar calor útil. Utilizadas en procesos industriales y para producir energía eléctrica a pequeña escala. Fig. 1.15.
- **Receptores de alta temperatura:** Este tipo de colectores se utilizan para la generación de energía eléctrica a una escala mucho mayor. Las temperaturas de trabajo generalmente superan los 500°C . Fig. 1.16.



Fig. 14: Colector solar de baja temperatura [24].



Fig. 15: Colector solar cilindro parabólico de media temperatura [25].



Fig. 16: Central termosolar tipo torre de alta temperatura [26].

Colectores cilindro parabólicos

En ellos, un tubo situado a lo largo de su zona focal transporta el fluido de trabajo mientras este se calienta.

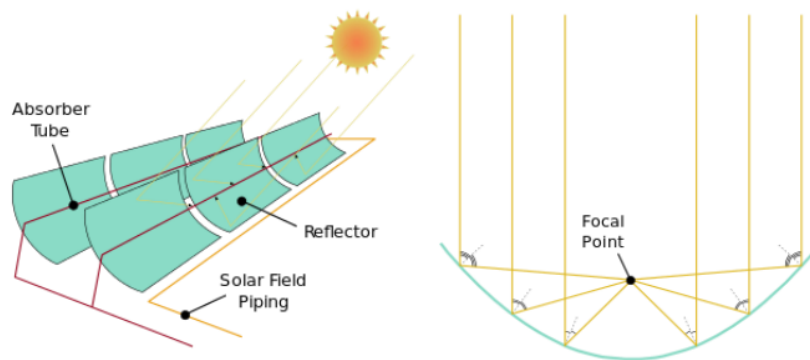


Fig. 17: Esquema funcionamiento de un colector cilindro parabólico [27].

Este tipo de colectores presenta una base con un sistema de transmisión mecánico que permite su rotación en función de la situación de la radiación solar, para ello se hace uso de un sensor solar formado por fotocélulas que se separan a través de una banda de sombra. El tubo es el elemento principal de estos sistemas, formado por dos tubos concéntricos donde el fluido circula por el tubo interior. Entre ambos tubos se genera vacío para reducir las pérdidas debido a la convección, además el tubo exterior posee un tratamiento antirreflexivo para aumentar la transmisividad y aumentar su rendimiento [28].



Fig. 18: Tubo de un colector cilindro parabólico [29].

Esta tecnología es la más desarrollada a nivel nacional e internacional respecto al resto de sistemas que hacen uso de la energía solar térmica [27], [30].

Su potencia puede variar entre los 50-200MW y suele trabajar con fluidos como sales inorgánicas, agua en sus fases líquida/vapor, o incluso mercurio aunque en menor proporción [30].

Disco Stirling

Sigue el esquema de funcionamiento de los colectores cilindro parabólicos basados en concentrar la energía solar, no obstante, en lugar de hacerlo a lo largo de una tubería esta se focaliza en un único punto, para ello hace uso de un espejo con forma de plato o disco. Presentan una mayor eficiencia energética ya que al concentrar la radiación en un único punto las pérdidas producidas son menores.

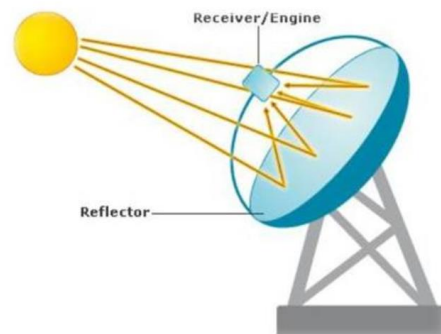


Fig. 19: Disco Stirling [31], [32].

Este tipo de estructuras están conectadas directamente a una fuente para generar energía y suelen utilizar como fluido de trabajo gases como el hidrógeno [27].

Su principal problema reside en el hecho de que no es capaz de almacenar energía por lo que esta se genera del mismo modo que las fuentes fotovoltaicas las cuales son más baratas [33].

Colectores Fresnel

Misma tecnología que la aplicada con los colectores cilindro parabólicos, no obstante los espejos utilizados son horizontales.

El reflector lineal Fresnel puede utilizar como receptor un tubo alargado situado a lo largo de los espejos o una torre colocada entre varios conjuntos de espejos reduciendo así costes de producción.

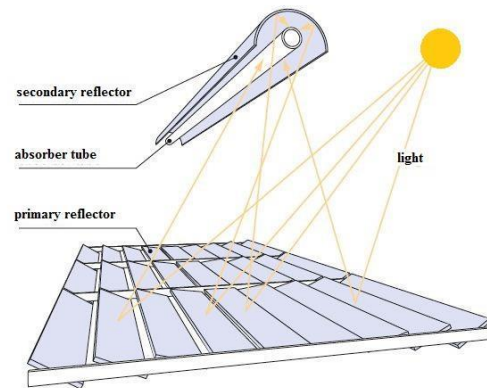


Fig. 20: Colectores Fresnel [34], [35].

Además para evitar la baja eficiencia óptica conseguida debido a las limitaciones de los espejos pueden colocarse varias torres para modificar la disposición de los espejos y así aumentar su eficiencia, también puede variarse la altura de la torre para tratar de conseguir una mayor radiación.

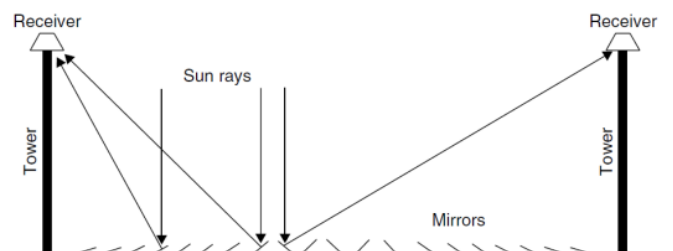


Fig. 21: Colector Fresnel con varias torres [28].

Debido al hecho de ser un receptor fijo permite utilizar variedad de fluidos como aceites, agua o sales fundidas.

1.3. Central termosolar tipo torre

Una central termosolar de tipo torre basa su funcionamiento en la absorción de calor procedente del Sol. La radiación proveniente de este incide sobre un gran número de heliostatos, los cuales reflejan y permiten concentrar toda esa energía en el receptor (energía de concentración). Circulando a través de este se encuentra un HTF, encargado de transportar el calor generado por parte de la radiación solar y permitiendo utilizar dicho calor para incrementar la eficiencia de un ciclo de generación de potencia a través de una turbina, siguiendo el esquema de un ciclo Rankine.

1.3.1. Funcionamiento

Este tipo de centrales están conformadas por una serie de elementos que hacen posible la generación de electricidad por medio de la radiación solar [36], [37].

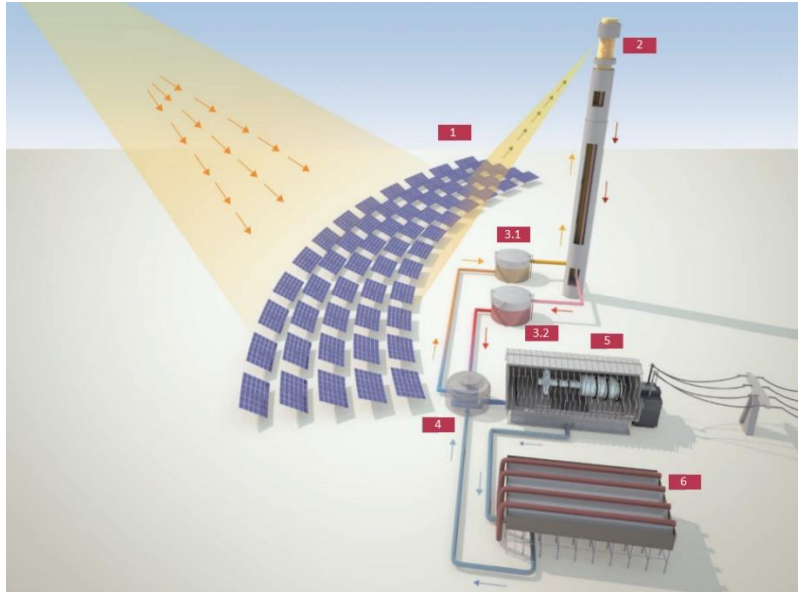


Fig. 22: Componentes que conforman una instalación de tipo torre central de dos circuitos [36].

1.3.1.1. Heliostatos

Un heliostato es básicamente un espejo que se encarga de dirigir los rayos solares directamente sobre la torre central. Como el Sol no se encuentra fijo en un único punto a lo largo del día sino que su posición depende de la rotación terrestre es necesario tener una gran cantidad de heliostatos para poder aprovechar al máximo la radiación incidente, es por ello que este tipo de centrales consta de un parque enorme con una gran cantidad de estos espejos. Además cada uno de los heliostatos está dotado de movimiento para poder seguir el movimiento del Sol aumentando la productividad de cada uno de estos.

Este tipo de heliostatos son capaces de concentrar un 97% de la radiación incidente sobre el receptor central [38], [39].

La distribución de los heliostatos en relación al receptor central está condicionada fundamentalmente por las características del terreno, el tamaño de la planta y la posición del receptor. Son dos las alternativas más utilizadas en función de las posibilidades que se presenten [40].

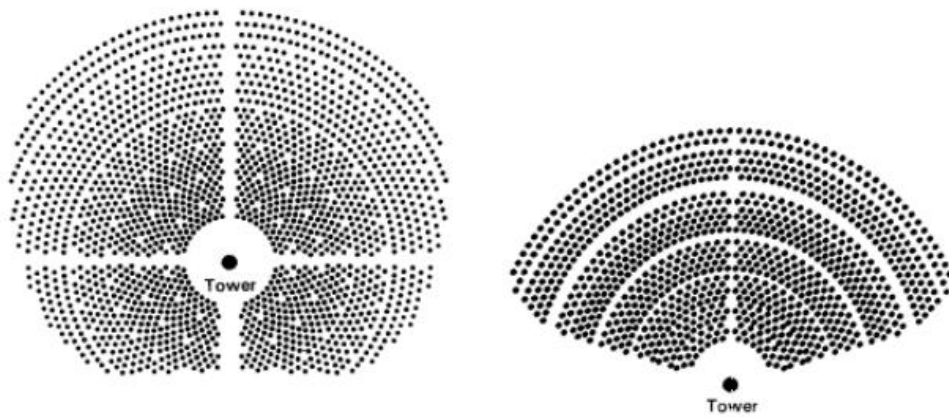


Fig. 23: Diseño de un campo de heliostatos tipo Circular (izquierda) y tipo Norte (derecha [41]).

La diferencia entre ambas distribuciones radica en el tipo de receptor utilizado, los parques de tipo Circular se utilizan con receptores circulares y los de tipo Norte con receptores planos o de cavidad. El tipo de receptor utilizado depende a su vez de factores que influyen en la pérdida de efectividad de estos, como puede ser el efecto sombra, o el efecto coseno entre otros [38], [41].

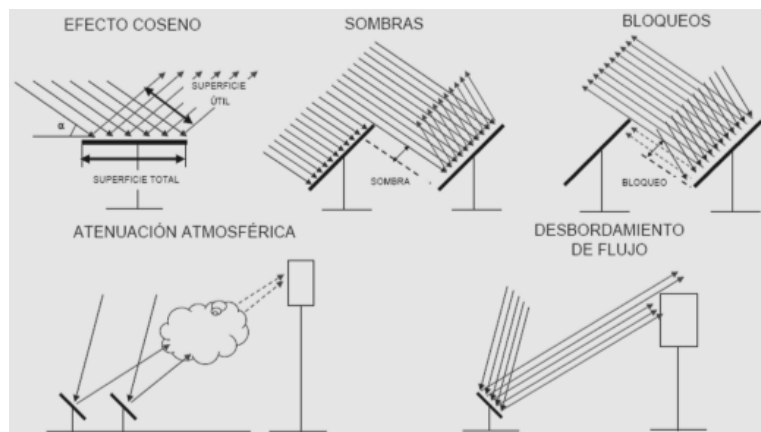


Fig. 24: Posibles problemas de los heliostatos [42].

1.3.1.2. Receptor

El receptor es la parte fundamental de este tipo de centrales, en él la radiación solar proveniente de la reflexión de los heliostatos se concentra sobre una zona concreta que suele estar a una altura considerada para reducir los problemas de los heliostatos y conseguir la máxima concentración posible, además es a través de esta torre por donde circula el HTF encargado del transporte de calor.

Los receptores solares pueden clasificarse dependiendo del factor que se tenga en cuenta, de esta forma pueden ser receptores de cavidad o externos en función de la disposición de los tubos, horizontales o verticales según la orientación de estos o también pueden clasificarse en función del HTF, ya sea agua, gases u otros fluidos que se describen más adelante [41]. Los receptores más utilizados son los de cavidad y los externos.

- **Receptores de cavidad:** Este tipo de receptores contienen en su interior los tubos que conforman el circuito del HTF. En las instalaciones con este tipo de receptor los heliostatos están orientados hacia el sur o hacia el norte para ser dirigidos hacia la apertura de este. La radiación solar incidente es bastante menor, no obstante las pérdidas producidas al ambiente también se ven reducidas [41], [43]. La cavidad puede cerrarse por medio de una cubierta aislante para evitar las pérdidas de calor durante las horas de no iluminación. Un ejemplo de este tipo de receptor se puede encontrar en la planta termosolar PS10 ubicada en la ciudad de Sevilla, España.



Fig. 25: Central termosolar PS10 con receptor de cavidad [44].



Fig. 26: Detalle de un receptor de cavidad [45].

- **Receptores externos:** A diferencia de los receptores de cavidad, en estos los tubos se encuentran en el exterior, en contacto con el ambiente, por lo que reciben gran parte de la radiación procedente de los heliostatos, de manera inversa, al recibir mayor radiación por encontrarse en contacto con el ambiente también sufren más pérdidas. Los receptores externos pueden ser planos, semicilíndricos o cilíndricos, siendo estos últimos los más utilizados en los campos de heliostatos Circulares ya que rodean por completo la torre central.



Fig. 27: Central termosolar Gemasolar con receptor externo cilíndrico [46].

1.3.1.3. *Tanque de almacenamiento de fluido*

La radiación solar no puede ser almacenada para su uso posterior, no obstante, si es posible almacenar la energía térmica para poder seguir operando en los periodos de baja radiación. Para ello se suele emplear un sistema basado en el calor sensible donde se almacena dicho calor en un volumen de fluido, utilizando para ello tanques de almacenamiento. Este tipo de centrales puede trabajar con ciclo simple o a través de un ciclo formado por dos circuitos.

Las centrales de circuito simple utilizan únicamente un fluido de trabajo (generalmente vapor de agua) del cual es utilizado tanto para el trabajo del receptor como para el almacenamiento, no obstante debido a su baja eficiencia y capacidad de almacenamiento, actualmente se están estudiando otro tipo de fluidos.

Por otro lado las centrales formadas por un receptor con dos circuitos utilizan dos tanques, uno donde se encuentra el fluido de trabajo a baja temperatura. Este fluido será el que pase por el receptor y transporte el calor recibido por la radiación (Punto 3.1 Fig. 1.22). Por otro lado, el segundo tanque contiene el fluido a elevada temperatura, este es transportado hasta el generador de vapor por donde ceden su calor, se enfrían y pasan de nuevo al primer tanque (Punto 3.2 Fig. 1.22).

Existen otros sistemas de almacenamiento de calor como puede ser el almacenamiento basado en el calor latente (asociado a cambios de fase) o basados en procesos termoquímicos pero son menos utilizados.



Fig. 28: *Tanques de almacenamiento [47].*

El uso de estos tanques de almacenamiento permiten aumentar la producción y la eficiencia energética entre otras ventajas.

1.3.1.4. *Bloque de potencia*

Basado en un ciclo Rankine, a excepción de que en lugar de utilizar una caldera se usa directamente un intercambiador entre el fluido de trabajo y el agua/vapor. En función del tamaño de las centrales pueden añadirse etapas de recalentamiento para mejorar la eficiencia del ciclo. Las partes de las que consta este bloque son:

- **Generador:** El fluido de trabajo a elevada temperatura cede su calor en este punto para producir vapor de agua el cual hace funcionar la turbina.
- **Turbina:** Conectada al generador eléctrico para producir electricidad.
- **Condensador:** El vapor de agua utilizado se enfría hasta su temperatura de condensación y vuelve al generador de vapor para ser reutilizado.

1.3.1.5. Sistema de conversión a la red

A la salida de la turbina se encuentra un generador eléctrico el cual permite transformar la energía mecánica producida por la turbina en energía eléctrica aprovechable a través de líneas de distribución pasando por una subestación eléctrica encargada de transformar la tensión de red.

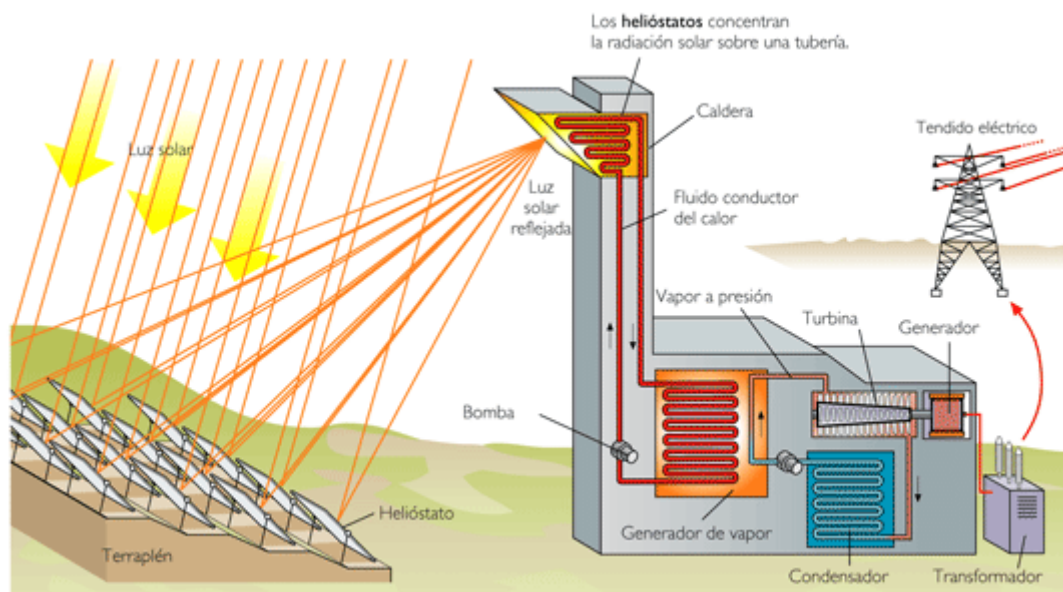


Fig. 29: Esquema de funcionamiento de una central termosolar de tipo torre con dos circuitos y receptor de cavidad [48].

1.4. Objetivos del proyecto

Las centrales termosolares son aún una tecnología en fase de desarrollo y continua optimización, a lo largo de este proyecto se va a analizar una de las partes principales de este tipo de instalaciones, el receptor que se encuentra en la torre central, más concretamente del sistema de tubos encargado del transporte del fluido transmisor de la energía calorífica.

Estos tubos están basados en una nueva tecnología conocida como tubo bayoneta la cual trae grandes beneficios con respecto al sistema de tubos simples utilizado actualmente.

Para su análisis se van a estudiar en modelos bidimensionales, el comportamiento de varios fluidos de trabajo, y como varía este al modificarse la forma del capuchón que posee el receptor de tipo tubo-bayoneta. A su vez, va a analizarse el efecto de la existencia



de excentricidad para estudiar el comportamiento del fluido y las variaciones de caída de presión que se obtienen en los capuchones.

Haciendo uso del método de estudio CFD, por medio del programa Ansys Fluent se pretende conocer la pérdida de carga que se produce en los distintos capuchones junto con otros factores de interés. Todos estos análisis preliminares servirán de base para futuros proyectos ampliando la información en este campo y desarrollando este tipo de tecnología para que en un mañana pueda convertirse en la energía principal de uso.

Los modelos analizados en este proyecto son una fase prueba para tener una primera idea del comportamiento del fluido de trabajo según diferentes condiciones tales como el capuchón utilizado o la excentricidad existente, por ello este proyecto está centrado en simulaciones en 2D.

Este proyecto debe ser utilizado como guía para realizar estudios tridimensionales con un mayor número de condiciones adicionales a tener en cuenta como puedan ser la gravedad, efectos de temperatura o inclusive el hecho de analizar modelos en 3D.

1.5. Estructura del proyecto

El presente proyecto se divide en los siguientes capítulos buscando alcanzar cierta facilidad a la hora de ser analizado y comprendido por cualquier lector.

Capítulo I Introducción y objetivos: Presenta una base sólida acerca de las energías renovables, haciendo hincapié en la energía solar. Pretende dar a conocer los tipos de energía solar centrándose en la energía solar térmica, todo ello para poder conocer más a fondo el funcionamiento y estructura de las centrales termosolares de tipo torre.

Capítulo II Receptores termosolares: Tras una introducción acerca del funcionamiento del receptor termosolar utilizado actualmente, se trata de explicar los principales problemas que posee el uso de este tipo de energía, de esta forma se pretende introducir el motivo por el cual se ha realizado este trabajo, el fluido de transporte más óptimo y su comportamiento en diferentes condiciones de diseño.

Capítulo III Descripción del sistema: Desarrollo de la geometría y propiedades de trabajo.

Capítulo IV Simulación bidimensional del tubo bayoneta: Comienza la fase en la cual se presentan los diversos diseños de estudio, dimensiones principales y tipos de capuchones junto con las excentricidades a analizar, como bien se indica se estudian cuatro modelos distintos de capuchones a distintas separaciones del límite del tubo unido a tres tipos de excentricidades distintas. Una vez concluida la etapa de diseño comienza la etapa de simulación, para ella es necesario realizar un correcto mallado además de definir correctamente todas las condiciones de estudio.

Capítulo V Resultados: Todos estos análisis realizados se grafican por medio de un código propio para poder observar las diferencias de los modelos estudiados.

Capítulo VI Presupuesto: Es importante conocer y estimar los costos derivados de la realización de este trabajo.

Capítulo VII Planificación del proyecto: Como cualquier proyecto que realiza una compañía, este se divide en diferentes tareas o fases, se va a tratar de esquematizar el proceso realizado a lo largo del proyecto dividiendo las distintas fases y realizando una estimación del tiempo dedicado a este trabajo, todo ello haciendo uso de un diagrama de planificación (Diagrama de Gantt).

Capítulo VIII Conclusiones y futuros trabajos: Una vez finalizado el proyecto se abren nuevas ventanas e incógnitas que pueden derivar en proyectos futuros tratando de resolver dichas cuestiones y tratando de ampliar la información sobre este tema todo lo posible.

Capítulo IX Bibliografía: Muestra toda la documentación utilizada y que ha servido de guía y apoyo para la consecución de este trabajo.

Anexos: Documentación adicional y complementaria que se ha aplicado a lo largo de este proyecto. En ellos se incluye el código Matlab utilizado para la graficación de resultados además de análisis y estudios complementarios.

CAPÍTULO II RECEPTORES TERMOSOLARES

CHAPTER II SOLAR THERMAL RECEIVERS

Una vez se han dado a conocer y se han definido brevemente las partes que componen este tipo de centrales a continuación se pasa a tratar en detalle el receptor de las centrales termosolares de tipo de torre, como bien se ha explicado anteriormente, son dos los modelos de receptores que destacan sobre el resto, los de cavidad y los externos, siendo este último en el que se centra el presente proyecto.

2.1. Problemas de los receptores solares convencionales

Ubicado en la parte superior de la torre central, el receptor externo está diseñado como un cilindro compuesto por una serie de paneles que permiten la circulación del fluidos por dos caminos diferentes. A su vez, cada uno de estos paneles que componen el cilindro contienen una serie de tubos por los cuales circula el fluido de trabajo [49].

Otro punto que también es importante en la fabricación de estos tubos, son las pérdidas de calor que se puedan producir en la parte posterior de estos, por ello suelen utilizarse aislamientos térmicos revestidos por un tipo de pintura denominada Pyromark blanco, que aumenta la reflectividad y sella la parte posterior de los tubos [49], [50].

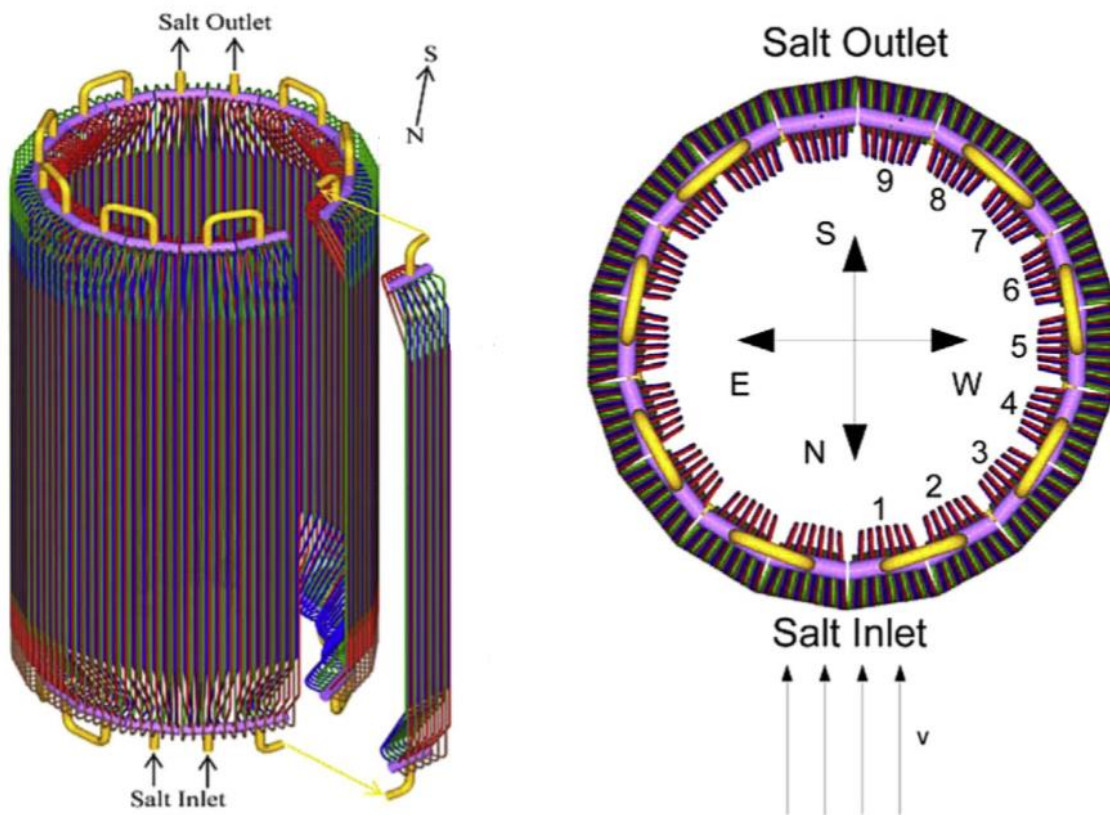


Fig. 30: Receptor cilíndrico externo de 18 paneles (9+9) [50].

Uno de los principales problemas que existe en este tipo de receptores es el deterioro prematuro de los tubos que componen el receptor cilíndrico, debido principalmente a dos sucesos.

El primero de ellos es la corrosión que se produce debido a los fluidos de trabajos que se utilizan y el segundo es la rotura de los tubos provocado por las altas temperaturas a las que están sometidos, esto se produce por el intento de aumentar la eficiencia de este tipo de centrales, haciendo que se encuentren sometidas a condiciones más extremas provocando el desgaste y la fatiga del material. Debido a esto, se están realizando estudios en dos campos distintos con el fin de evitar este tipo de problemas.

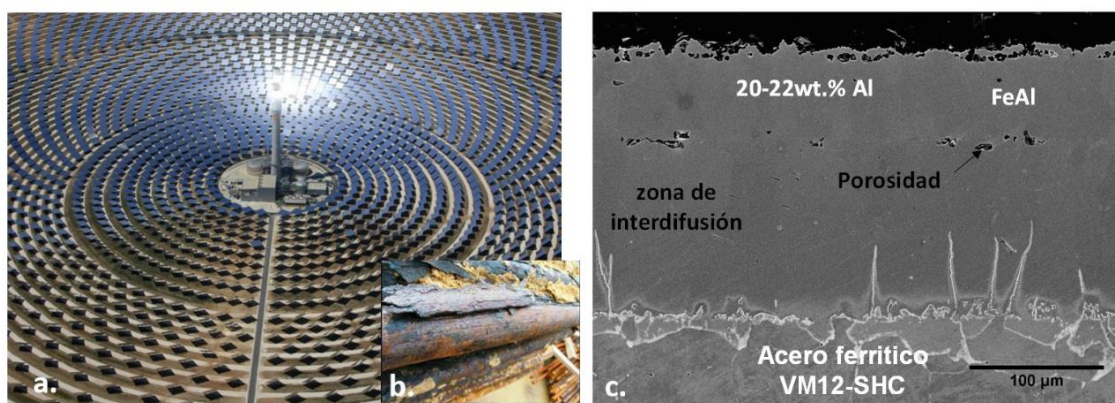


Fig. 31: a) Planta termosolar Gemasolar, b) Problemas de corrosión en un tubo, c) Imagen microscópica de un recubrimiento protector sobre un acero ferrítico [51].

2.2. Alternativas en el diseño de los tubos

Debido a los altos gradientes de temperatura que soportan los receptores se están investigando nuevas alternativas referentes al diseño de los tubos que forman los paneles de los receptores cilíndricos.

Actualmente los tubos utilizados son tubos simples, no obstante, Derwal J. Erasmus plantea un nuevo modelo denominado ‘Tadpole’. Este modelo surge a partir de investigaciones que demuestran como el efecto de fluidos que trabajan como un chorro de impacto ‘Jet Impingemet’ son adecuados para los receptores solares debido a la buena transferencia de calor producida, además busca solventar los problemas que producidos por la elevada pérdida de carga producida por la repentina expansión del fluido [52].

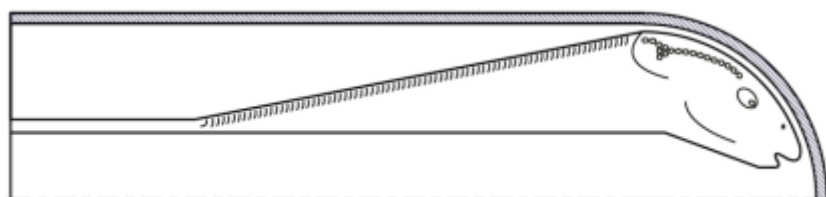


Fig. 32: Representación axilsimétrica de un modelo ‘Tadpole’ en 2D [52].

Otra alternativa que actualmente también está siendo investigada es la utilización de tubos bayoneta, en lugar de tubos simples. El tubo bayoneta consiste en un tubo circular interior, por el cual entra el fluido y un tubo anular exterior a través del cual el fluido sale, de esta manera el fluido que circula por el tubo anular, el cual recibe la radiación, puede ceder parte de ese calor al agua que circula por el tubo circular, reduciendo las altas temperaturas que soportan los tubos [39].

Este tipo de tubos presentan un capuchón en su parte superior que permite la recirculación del fluido.

Otro aspecto importante y que también es analizado, es la influencia de la excentricidad entre los tubos. La existencia de un valor de excentricidad, según el artículo publicado por R. Pérez Álvarez [53], permite aumentar el flujo másico en la zona donde la transferencia de calor es más elevada aumentando el coeficiente de transferencia de calor en dicha zona ($\theta=0^\circ$).

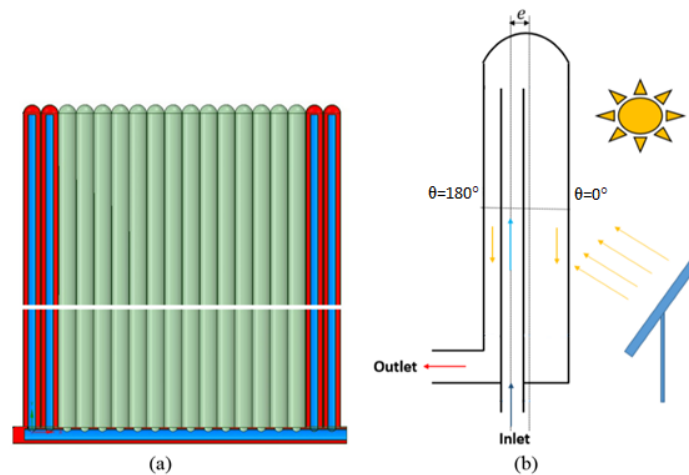


Fig. 33: a) Representación esquemática de un panel formado por tubos bayoneta, b) Representación de un tubo bayoneta con excentricidad [53].

De esta manera se podrían reducir los gradientes de temperatura, además de reducir ligeramente la caída de presión en la zona anular. Dichos efectos mencionados van a ser objeto de estudio y para ello se analizan distintos modelos de capuchones y distintos fluidos junto con distintos valores de excentricidad.

2.3. Fluidos de trabajo

Son dos los HTF más utilizados para el transporte de calor en las centrales termosolares de tipo torre.

El primero de ellos, y el más conocido por todos es el agua, no obstante, no se hace uso de agua líquida como tal, ya que, las altas temperaturas de trabajo provocarían la evaporación de este, por ello se utiliza en su estado de vapor saturado o sobrecalentado. Este fluido se utiliza principalmente en las centrales que operan con un único circuito.



El segundo de ellos es la sal solar, también conocida como sal solar Hitec, sus propiedades permiten que opere a elevadas temperaturas y además es un fluido bastante económico, no obstante, también es bastante corrosivo.

Debido a los inconvenientes que plantean ambos fluidos, se están estudiando alternativas a estos, dichos estudios se basan en la búsqueda de recubrimientos que permitan evitar o reducir los efectos corrosivos, o por otro lado, tratar de utilizar nuevos fluidos de trabajo, que mejoren su comportamiento y obtengan eficiencias similares o incluso mayores. En este proyecto se añade un nuevo fluido el Sodio Líquido y, adicionalmente, se analiza otra alternativa conocida como LBE.

Debido al hecho de que para este trabajo no se tienen en cuenta efectos relacionados con la temperatura, las propiedades del agua se han tomado a temperatura ambiente (25°C), ya que son las propiedades que vienen intrínsecamente en Ansys, no obstante, y según la fuente Daniel Iglesias [47] Los valores del resto de fluidos se definen para un valor de temperatura de 290°C (563K) temperatura a la que suelen trabajar este tipo de centrales.

Para obtener las ecuaciones que permiten calcular las propiedades de la sal solar, del sodio y del LBE también, se hizo uso del proyecto de Miguel Ángel Moreno Avilés [39].

Para poder definir bien las propiedades de los distintos fluidos, únicamente es necesario definir cuatro de ellas.

- Conductividad térmica
- Viscosidad dinámica
- Densidad
- Calor específico

2.3.1. Propiedades del agua

Utilizado en su estado de vapor sobrecalentado este fluido presenta dos grandes inconvenientes a la hora de ser utilizado, el primero de ellos es su dificultad para ser almacenado y el segundo de ellos es su alto nivel de corrosión en aleaciones y aceros inoxidables.

Como bien se ha indicado previamente su estudio sirve únicamente para analizar comportamientos y por ello sus propiedades son las de estado líquido a una temperatura de 25°C.

2.3.2. Propiedades de la sal solar

Se trata de una sal fundida con una composición química de 60% NaNO_3 y 40% KNO_3 , este fluido es estable térmicamente a temperaturas superiores a los 600°C y tiene unas propiedades similares a las del vapor a alta temperatura, además su elevada capilaridad



(capacidad de desplazarse por un tubo capilar, en función de su tensión superficial) y facilidad de almacenamiento lo convierten en un fluido óptimo. No obstante, presenta problemas de corrosión a temperaturas superiores a los 600°C y su punto de fusión relativo es elevado a 223°C [54].

Conductividad térmica

$$k \text{ (} \frac{W}{m \cdot K} \text{)} = 0.391 + 1.9 \cdot 10^{-4} \cdot T(K) \quad (1)$$

Viscosidad dinámica

$$\mu \text{ (} Pa \cdot s \text{)} = 0.075474 - 2.775 \cdot 10^{-4} \cdot T(K) + 3.488 \cdot 10^{-7} \cdot T(K)^2 - 1.474 \cdot 10^{-10} \cdot T(K)^3 \quad (2)$$

Densidad

$$\rho \text{ (} \frac{kg}{m^3} \text{)} = 2263.6 - 0.636 \cdot T(K) \quad (3)$$

Calor específico

$$C_p \text{ (} \frac{J}{kg \cdot K} \text{)} = 1396 + 0.172 \cdot T(K) \quad (4)$$

2.3.3. Propiedades del sodio líquido

El sodio líquido es un metal alcalino que presenta las siguientes características:

- Bajos valores de densidad.
- Bajos valores de temperatura de fusión
- Buena conductividad térmica y alta capacidad calorífica.

Debido a la temperatura máxima que puede alcanzar las plantas basadas en sales fundidas están limitadas a la hora de generar electricidad, además su elevada combustibilidad cuando está en contacto con agua lo que se traduce en accidentes graves de difícil extinción, por último, este fluido presenta problemas de corrosión a elevadas temperaturas [39].

Conductividad térmica

$$k \text{ (} \frac{W}{m \cdot K} \text{)} = 110 - 0.0648 \cdot T(K) + 1.16 \cdot 10^{-5} \cdot T(K)^2 \quad (5)$$

Viscosidad dinámica

$$\mu \text{ (} Pa \cdot s \text{)} = 0.003364 - 1.36 \cdot 10^{-5} \cdot T(K) + 2.299 \cdot 10^{-8} \cdot T(K)^2 - 1.775 \cdot 10^{-11} \cdot T(K)^3 + 5.173 \cdot 10^{-15} \cdot T(K)^4 = 0.0003465 \quad (6)$$



Densidad

$$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)} = 1020 - 0.241 \cdot T(K) \quad (7)$$

Calor específico

$$C_p \text{ (J/(kg} \cdot \text{K))} = 1732 - 1.266 \cdot T(K) + 1.031 \cdot 10^{-3} \cdot T(K)^2 - 2.369 \cdot 10^{-7} \cdot T(K)^3 \quad (8)$$

2.3.4. Propiedades del LBE

Otro de los fluidos que se tuvo en cuenta para realizar el estudio en los diversos modelos de receptores fue el Plomo-Bismuto eutéctico, también conocido como LBE, no obstante, sus propiedades, más concretamente, su elevada densidad dificulta considerablemente su análisis.

Metal pesado con mayor punto de ebullición que el Sodio, pero con menor capacidad calorífica y conductividad térmica.

Pese a que son capaces de oxidarse a mayor lentitud que otros fluidos si se encuentran en contacto con agua o aire, su principal desventaja es la corrosión, por lo que, para su uso, se utilizan inhibidores de la corrosión, reduciendo la velocidad de esta.

Conductividad térmica

$$k \text{ (W/(m} \cdot \text{K))} = 3.44 + 0.0142 \cdot T(K) \quad (9)$$

Viscosidad dinámica

$$\mu \text{ (Pa} \cdot \text{s)} = 0.02644 - 1.365 \cdot 10^{-4} \cdot T(K) + 3.1 \cdot 10^{-7} \cdot T(K)^2 - 3.612 \cdot 10^{-10} \cdot T(K)^3 + 2.123 \cdot 10^{-13} \cdot T(K)^4 - 4.997 \cdot 10^{-17} \cdot T(K)^5 \quad (10)$$

Densidad

$$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)} = 11047 - 1.2564 \cdot T(K) \quad (11)$$

Calor específico

$$C_p \text{ (J/(kg} \cdot \text{K))} = 154.2 - 0.008727 \cdot T(K) - 1.031 \cdot 10^{-5} \cdot T(K)^2 + 1.15 \cdot 10^{-8} \cdot T(K)^3 \quad (12)$$

TABLA 1: PROPIEDADES DE LOS DIFERENTES FLUIDOS.

Propiedad	Agua	Sal solar	Sodio líquido	LBE
Conductividad térmica (k) $W/(m \cdot K)$	0.6	0.498	77.19	14.41
Viscosidad dinámica (μ) $Pa \cdot s$	0.001003	0.003496	0.0003465	0.00131
Densidad (ρ) kg/m^3	998.2	1905.53	884.317	10065.51
Calor específico (C_p) $J/(kg \cdot K)$	4182	1492.836	1303.76	141.05

CAPÍTULO III DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

CHAPTER III SISTEM DESCRIPTION

3.1. Descripción del sistema

El dimensionamiento inicial del tubo a estudiar parte de los parámetros que aparecen en el artículo publicado por Rafael Pérez Álvarez [53].

TABLA 2: PARÁMETROS DEL DISEÑO INICIAL

Parámetro	Valor
Longitud de los tubos (L) m	10
Diámetro exterior del tubo exterior (D_e) mm	44.6
Espesor (z) mm	1.2
Relación de áreas (RA)	1

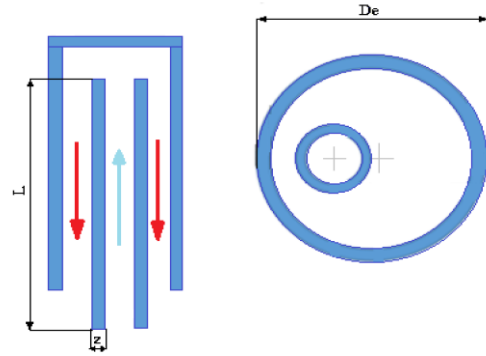


Fig. 34: Esquema del diseño del receptor tubo

Conociendo el diámetro exterior y el espesor se obtiene el valor de diámetro interior del tubo circular:

$$D_i = D_e - 2 \cdot z \quad (13)$$

$$D_i = 42.2 \text{ mm}$$

La relación de áreas entre el tubo circular y el tubo anular permite calcular el diámetro exterior del tubo anular. El caso de estudio a desarrollar será para una relación de áreas igual a la unidad.

$$RA = \frac{A_{\text{anular}}}{A_{\text{circular}}} = \frac{(D_i^2 - d_e^2)}{(d_e - 2 \cdot z)^2} \quad (14)$$

$$d_e = 31 \text{ mm}$$

$$d_i = 31 - 2 \cdot 1.2 = 28.6 \text{ mm}$$

La ecuación de flujo másico permite cuantificar un valor de velocidad en función de la densidad del fluido. Para un primer estudio se analizará para el caso de agua.

$$\dot{m}_{\text{tubo}} = \rho \cdot v \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_i^2 \quad (15)$$

María de los Reyes Rodríguez Sánchez en su tesis doctoral [54] señala que el flujo másico máximo del receptor de la central termosolar Gemasolar es de 335 kg/s (695 m³/h), por lo que se partirá de dicho dato:

Por otro lado, también se señala los valores mínimos de velocidad y de flujo másico que pueden llegar a generarse en el receptor.

$$v_{min} = 0.19 \text{ m/s}$$

$$\dot{m}_{min} = 27.37 \text{ kg/s}$$

El receptor por analizar consta de 2 paths (zonas de circulación) y 41 tubos, por lo que, se debe calcular el flujo másico que circula por un único tubo, ya que, simplemente se estudia uno.

$$\dot{m}_{tubo} = \frac{\dot{m}_{receptor}}{n^{\circ}paths * n^{\circ}tubos} \quad (16)$$

$$\dot{m}_{tubo} = 4.085 \text{ kg/s}$$

Por medio de la ecuación (15) se obtiene que la velocidad del fluido es de:

$$v_{agua} = 6.37 \text{ m/s}$$

Dicho valor de velocidad se considera como la velocidad inicial en la entrada, parámetro que se indica en el programa Ansys Fluent para hacer la simulación.

A partir de este se realiza una simulación para conocer el comportamiento del fluido en función de los datos obtenidos previamente, para ello, se realiza un primer estudio para un capuchón semicircular con radio igual a $\frac{D_i}{2}$.

Tras realizar el análisis se observa como en la zona más crítica del modelo se obtienen picos de velocidad de 22 m/s, consiguiéndose un valor en la salida del tubo entre 11-14 m/s. Estos valores se transforman en unos valores de presión cercanos a los 14 bares para un único tubo del receptor, lo que implica un valor excesivamente grande para el caso estudiado.

Según el artículo publicado por M.R. Rodríguez Sánchez [49] la caída de presión máxima que puede darse en un receptor termosolar es de 20 bares, por lo que, vistos los resultados obtenidos en este primer análisis se decide realizar un dimensionamiento del gasto másico inicial del tubo con el fin de asemejarse a un caso real de operación donde no se alcanzan valores de velocidad tan elevados.

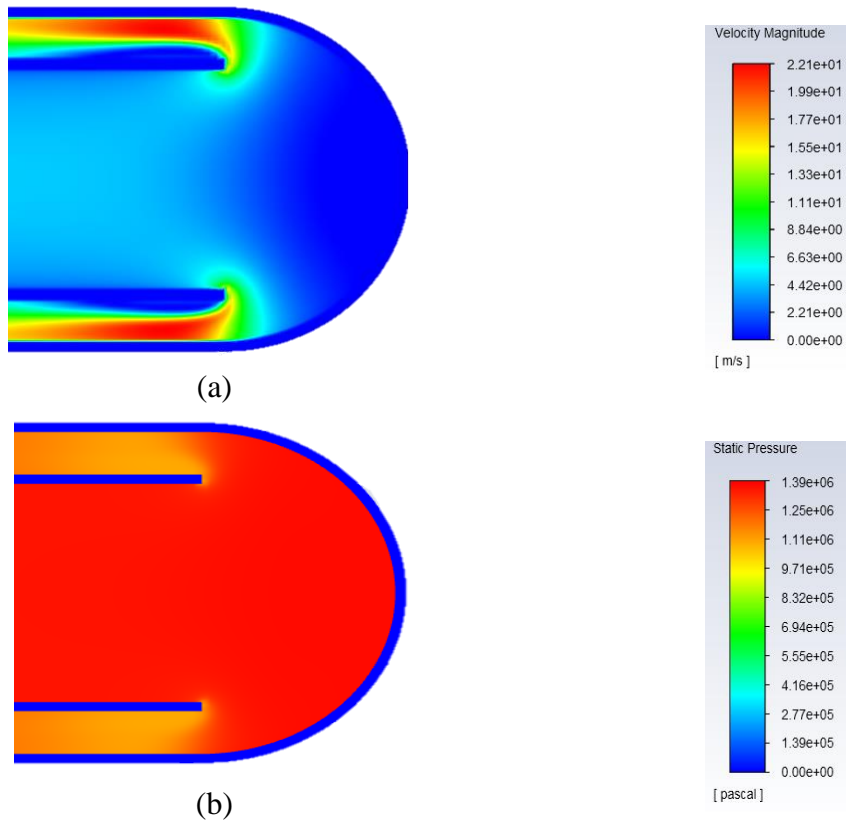


Fig. 35: Contorno de velocidades (a) y presiones (b) para el diseño inicial.

Por ello se decide realizar una modificación en el diseño del tubo para tratar de reducir los valores de presión tan elevados que se han obtenido, para ello se modifica el valor de la relación de áreas:

$$RA = 2$$

$$d_e = 25mm$$

$$d_i = 31 - 2 \cdot 1.2 = 22.6mm$$

Otro aspecto que se modifica es el valor de flujo másico, ya que, previamente se ha cogido el valor máximo que puede circular por el receptor, ahora se estudiará un valor menor, aproximadamente la mitad de este $\dot{m}_{receptor} = 150 \text{ kg/s}$. Por lo que:

$$v_{agua} = 5 \text{ m/s}$$

TABLA 3: PARÁMETROS DEL DISEÑO FINAL

Parámetro	Valor
Longitud de los tubos (L) m	10
Diámetro exterior del tubo exterior (D_e) mm	44.6
Espesor (z) mm	1.2
Relación de áreas (RA)	1
Diámetro interior del tubo exterior (D_i) mm	42.2
Diámetro exterior del tubo exterior (d_e) mm	25
Diámetro interior del tubo exterior (d_i) mm	22.6

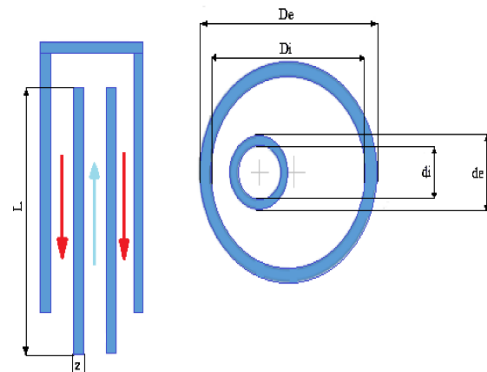


Fig. 36: Esquema final del diseño del receptor

Una vez se tienen las dimensiones de cómo se va a diseñar el tubo a analizar se pasa ahora a la utilización del programa Ansys Fluent, en los siguientes apartados se explica el proceso llevado a cabo para poder estudiar todos los diferentes modelos de tubos con sus respectivos capuchones, centrándose en su diseño, mallado y en el análisis.

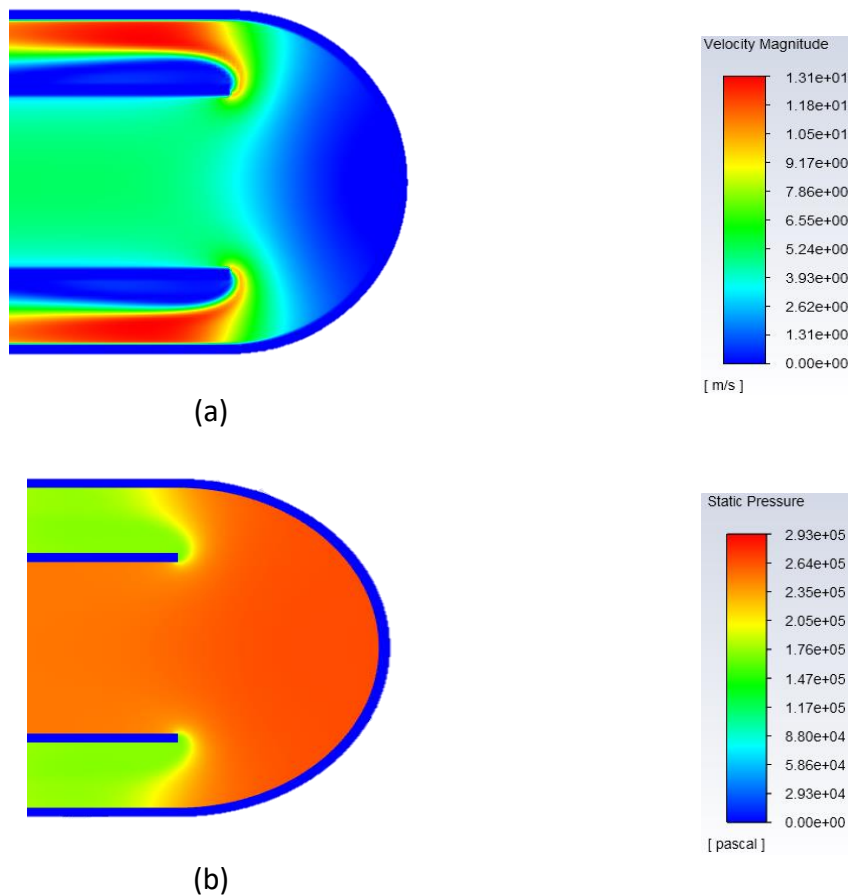


Fig. 37: Contorno de velocidades y presiones para el diseño final.

CAPÍTULO IV SIMULACIÓN BIDIMENSIONAL CFD CHAPTER IV CFD TWO-DIMENSIONAL SIMULATION

4.1. Geometría

El presente proyecto se centra en cuatro modelos distintos de capuchón para el receptor tubo bayoneta. Los distintos tipos de capuchones a su vez van a ser estudiados para cuatro separaciones distintas respecto de la zona de bifurcación, de esta manera, se podrá llegar a conocer con mayor profundidad cómo se comportan los fluidos en diversas situaciones.

Por último, se añade el caso de estudio de cómo influye en el comportamiento del fluido, el caso de que los tubos concéntricos se encuentren a excentricidades distintas.

De esta manera y tras analizar más de 190 modelos distintos se tendrá un mayor conocimiento de cómo se comporta un fluido según qué condiciones de diseño, y qué tipo de modelo ofrece resultados más óptimos para este tipo de receptores.

4.1.1. Geometría de los tubos

Tipos de excentricidades

Unido al estudio de los cuatro modelos diferentes de capuchón se han añadido tres modelos distintos de tubos. la variación entre estos reside en la excentricidad existente entre el tubo interior y el tubo exterior; Excentricidad nula (concéntricos), Excentricidad=0.25, Excentricidad=0.4.

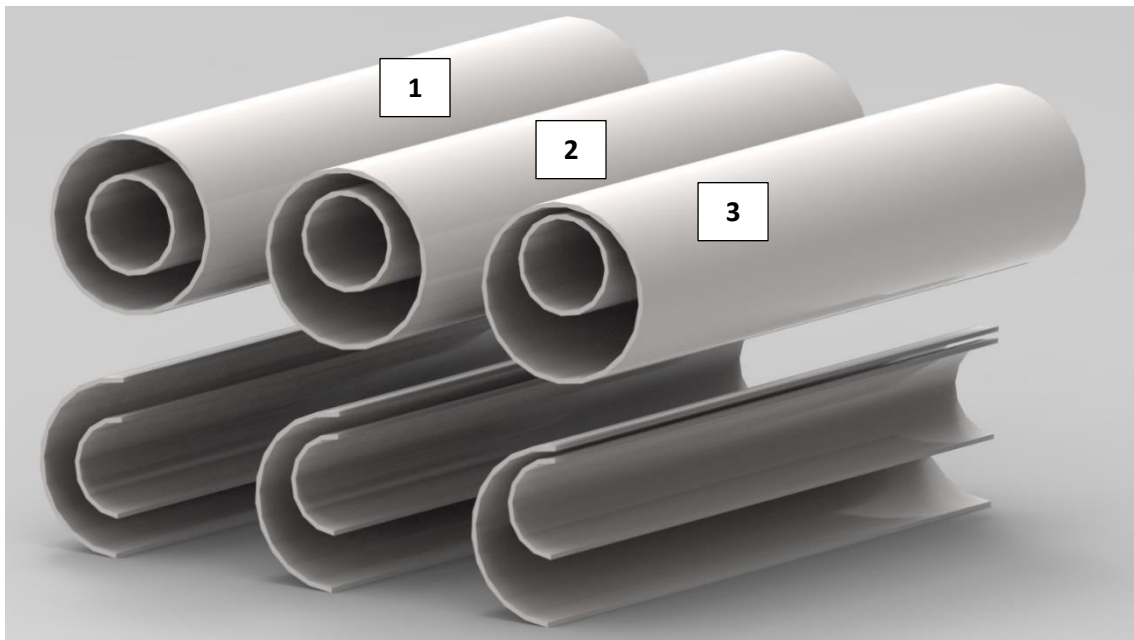


Fig. 38: Diseño 3D de los modelos de tubos; 1-Tubos con $\xi=0$ (concéntricos), 2-Tubos con $\xi=0.25$, 3-Tubos con $\xi=0.4$.

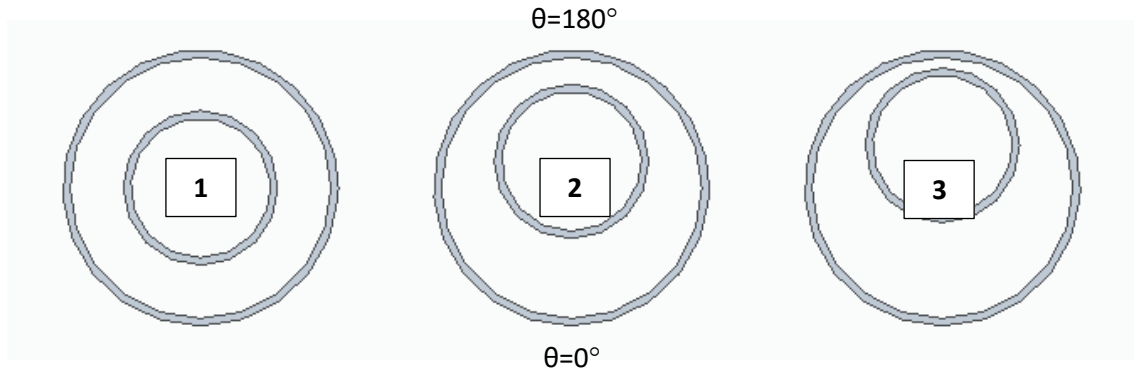


Fig. 39: Representación frontal en 2D de los modelos de tubos; 1-Tubos con $\xi=0$ (concéntricos), 2-Tubos con $\xi=0.25$, 3-Tubos con $\xi=0.4$.

Por medio de esta excentricidad se consigue aumentar la separación de los tubos en $\theta=0^\circ$, zona de incidencia de la radiación solar, para ello, a partir de los valores de excentricidad, definidos como datos al inicio del proyecto, se calcula el valor de separación existente entre el tubo interior y el tubo exterior:

$$\xi = \frac{e}{D_i - D_e} \quad (17)$$

Para $\xi=0.25$:

- $e=4.3\text{mm}$

Para $\xi=0.4$:

- $e=6.88\text{mm}$

Para el diseño de los tubos en Ansys Fluent hay que tener en consideración una serie de puntos, el primero de ellos es el origen de coordenadas, ya que, de él va a depender posteriormente si el valor de velocidad a introducir es positivo o negativo.

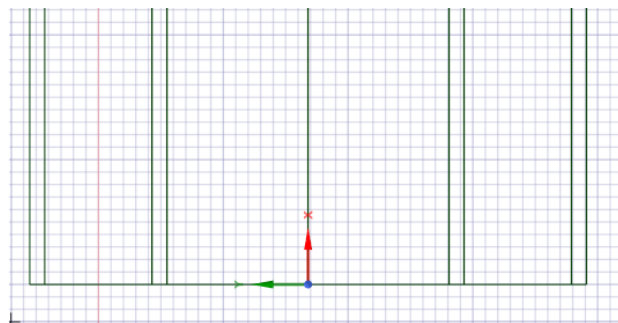


Fig. 40: Origen de coordenadas como punto inicial para el diseño del tubo.

El diseño tanto del tubo interior como del exterior es siempre el mismo, con una longitud total de 10 metros y un espesor de tubos de 1.2 milímetros, excepcionalmente este modelo se ve modificado en función del tipo de excentricidad analizada.



Fig. 41: Origen de coordenadas como punto inicial para el diseño del tubo.

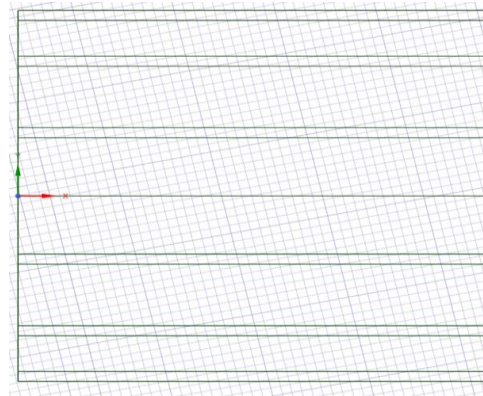


Fig. 42: Origen de coordenadas como punto inicial para el diseño del tubo.

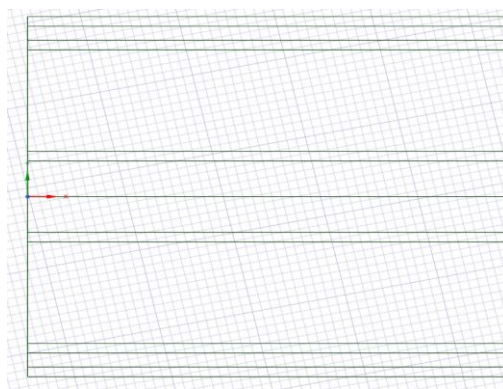


Fig. 43: Origen de coordenadas como punto inicial para el diseño del tubo.

Las líneas añadidas adicionalmente al diseño del tubo, sirven única y exclusivamente para tratar de simplificar y mejorar el mallado de los distintos modelos, es por ello, que dependiendo del tipo de capuchón a estudiar y de la excentricidad existente, el diseño tanto de los tubos como de los capuchones puede variar significativamente, pero se incide en el hecho de que esto no influye a la hora de obtener los resultados, ya que, en la etapa de mallado se delimitan las diversas zonas existentes.

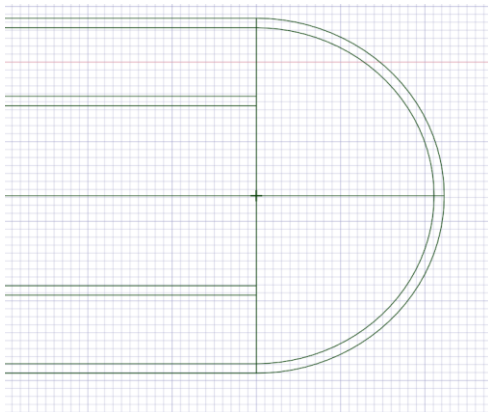


Fig. 44: Diseño de un tubo con capuchón semicircular, con separación igual a 22.3mm y excentricidad igual a 0.

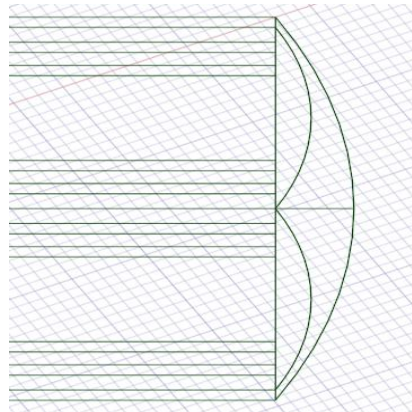


Fig. 45: Diseño de un tubo con capuchón con bifurcación, con separación igual a 5.6mm y excentricidad igual a 0.4.

4.1.2. Geometría de los capuchones

Cuatro son las alternativas de diseño planteadas para analizar en detalle el comportamiento del fluido de trabajo. Los modelos a analizar tratan de conseguir la menor pérdida de carga posible.

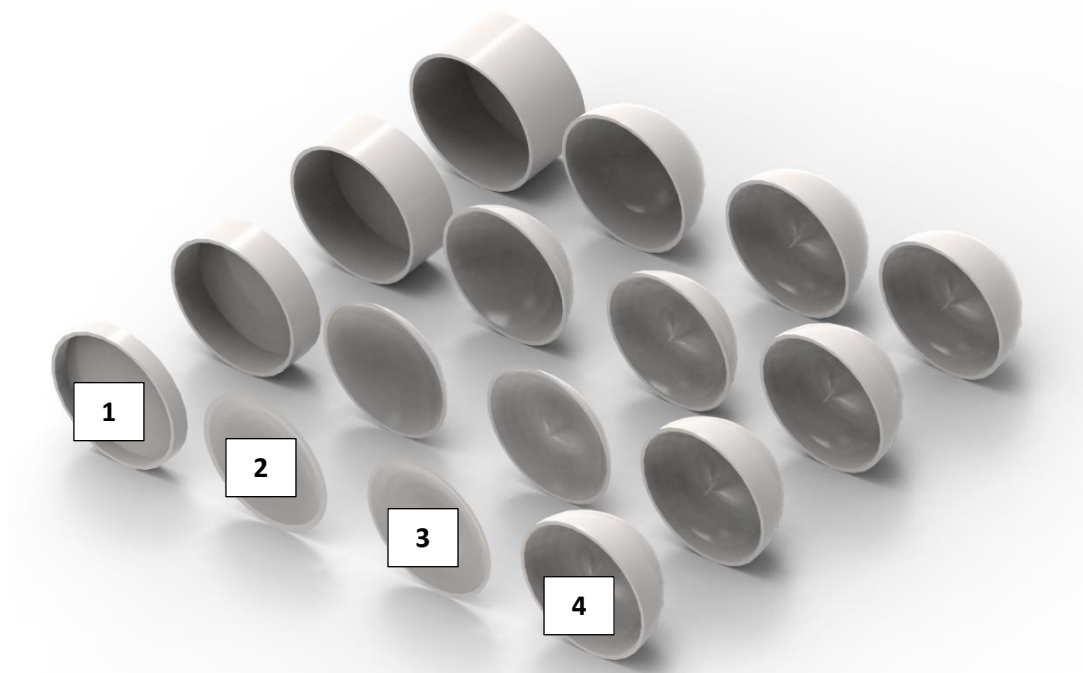


Fig. 46: Diseño 3D de los modelos de capuchones; 1-Capuchón plano, 2-Capuchón semicircular, 3-Capuchón con bifurcación, 4-Capuchón con bifurcación más separación.

Estas cuatro alternativas están basadas en:

- Capuchón plano.
- Capuchón semicircular.
- Capuchón con bifurcación.

- Capuchón con bifurcación unido a una separación adicional.

Estos capuchones están diseñados de tal manera que vaya variando la distancia que hay entre el límite de los tubos y la zona superior del capuchón. De este modo cada uno de los capuchones es estudiado en función de cuatro separaciones distintas.

- 5.6 milímetros.
- 11.2 milímetros.
- 16.8 milímetros.
- 22.3 milímetros.

Se trata de averiguar cuánto aumenta la caída de presión en el capuchón a medida que la separación existente es menor.



Fig. 47: Diseño 2D de los modelos de capuchones; 1-Capuchón plano, 2-Capuchón semicircular, 3-Capuchón con bifurcación, 4-Capuchón con bifurcación más separación.

Capuchón plano: Su ventaja principal reside en la sencillez de este. Al tratarse de un modelo de diseño básico, se utiliza como base para observar cómo se comporta el fluido. Su principal defecto reside en el factor de que no existe un medio el cual permita una redistribuya el fluido hacia el tubo anular, por lo que las pérdidas de carga que se produzcan en la zona del codo pueden llegar a ser elevadas.

Capuchón semicircular: Trata de generar una zona de recirculación en el límite de este eliminando las aristas para así también evitar el aumento de las pérdidas secundarias.



Capuchón con bifurcación: Estos dos modelos buscan conducir el fluido hasta el tubo anular desde que este sale por el tubo circular buscando reducir drásticamente la pérdida de carga que pudiera generarse en la zona del codo.

La primera variante trata de comprobar si reduciendo el arco de recirculación los resultados mejoran o empeoran, mientras que la segunda variante analiza las variaciones que se producen a medida que aumenta la distancia desde el codo hasta la zona de recirculación.

4.2. Etapa de mallado

El MEF permite la resolución de ecuaciones diferenciales complejas dividiendo el objeto de estudio en elementos o celdas más pequeños, por lo que permite pasar de un número infinito de incógnitas a un número limitado de elementos cuyo comportamiento está correctamente definido.

Para conseguir la mayor precisión en los análisis es preciso generar un mallado lo más preciso y estructurado posible, para ello, el mejor método es tratar de conseguir que los elementos que forman la malla sean lo más pequeños y similares posible. Contra más elementos haya y más pequeños sean los resultados que se obtienen son más precisos.

Cabe destacar que el programa que se ha utilizado es una versión académica, por lo que no se permite exceder de 512000 celdas.

4.2.1. Mallado de los tubos

Como bien se ha explicado en el apartado anterior, en función de la excentricidad que se tenga el número de líneas que componen el diseño del tubo será de una forma u otra, tratando de buscar la simetría de este.

La opción “Face Meshing” permite generar una zona mapeada con las caras que han sido seleccionadas, es decir, genera una especie de zona independiente de mallado, En los tubos se pueden diferenciar fácilmente la zona tubular, compuesta por el tubo anular y el tubo circular y la zona correspondiente al capuchón.

La zona tubular es mucho mayor que la zona del capuchón, por lo que, si se tratara de diseñar las celdas que conforman el tubo con el mismo tamaño que las celdas que componen el capuchón serían necesarias una gran cantidad de estas, y Ansys Fluent permite un número limitado de celdas. Por ello es necesario utilizar la función “Bias Factor”, la cual permite, para un mismo número de elementos, agrupar en mayor cantidad las celdas en la zona que se requiera, en este caso se trata de la zona más próxima al capuchón, ya que es la zona que interesa estudiar y donde más precisión se necesita, y aumentar el tamaño de estos (reduciendo su cantidad) en la zona inicial del tubo donde la precisión de los datos no es tan importante.

A mayor valor de Bias Factor, hay mayor concentración de elementos en la zona más próxima al capuchón.

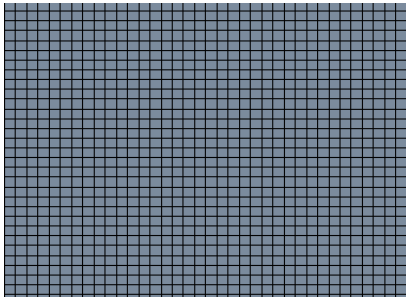


Fig. 48: Mallado del tubo en la zona más próxima al capuchón.

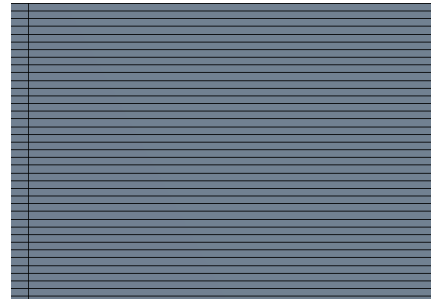


Fig. 49: Mallado del tubo en la zona más alejada del capuchón.

4.2.2. Mallado de los capuchones

Al tener distintos modelos de capuchón, tanto su diseño como su mallado no puede ser el mismo, por ello, cada uno de los capuchones analizado ha sido tratado de manera diferente.

Capuchón plano

Debido a que es una versión muy simple, basada en líneas horizontales y verticales, no es necesario que el diseño sea simétrico. Al tratarse simplemente de una extensión de la zona del tubo (en términos geométricos) el mallado se realiza de la misma forma que este.

El efecto de la excentricidad en este modelo no afecta para su mallado y únicamente se tiene que aumentar el número de elementos a medida que la separación aumenta.

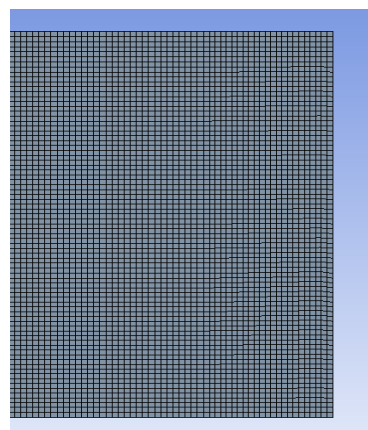
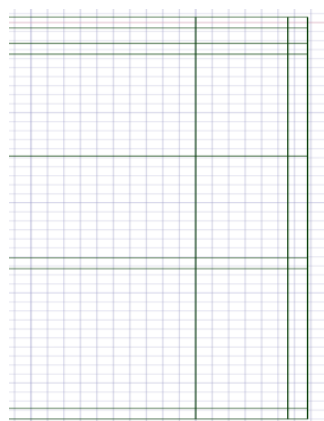


Fig. 50: Diseño y mallado de un tubo con cúpula plana (Excentricidad 0.4; Separación=5.6mm).

Capuchón semiesférico

Al tener una geometría diferente a la del tubo es necesario añadir un nuevo “Face Meshing”, esta vez para la zona del capuchón, de esta manera, se tienen dos zonas independientes donde conectan sus nodos.

El diseño del tubo si tiene que ser simétrico, ya que tanto en este modelo como en los siguientes la excentricidad va a afectar en el mallado.

Al igual que en el capuchón plano, al aumentar la separación se tienen que aumentar el número de elementos.

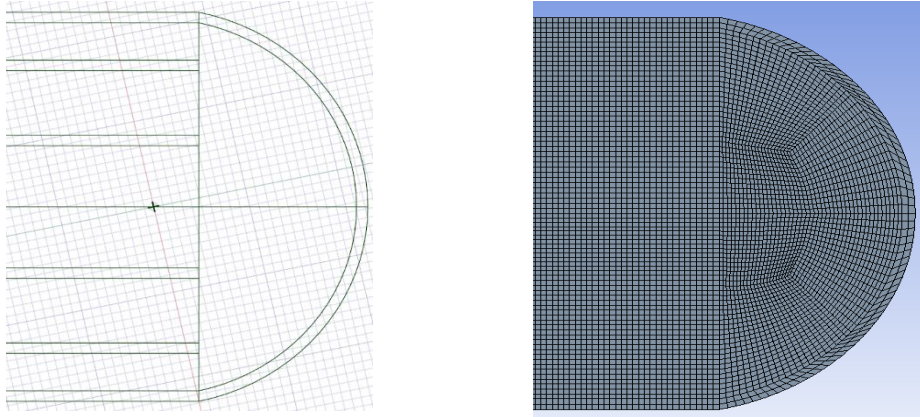


Fig. 51: Diseño y mallado de un tubo con cúpula semicircular (Excentricidad 0.25; Separación=16.8mm).

Capuchón con bifurcación

Debido a la complejidad de este modelo se plantearon diversas alternativas para tratar de obtener el mallado más óptimo posible.

Para este caso, la variación de la separación consiste en reducir el radio de la zona de recirculación y de la pared exterior.

Hay que tener en cuenta que este capuchón presenta el inconveniente de que su diseño varía significativamente al modificar la separación, y por ello, el mallado también va a variar. Es por ello, que se precisa generar un diseño que permita modificar únicamente el número de elementos a añadir, en función de la separación y excentricidad existente.

Este modelo de capuchón es el más complicado de mallar, ya que, independientemente de generar varias zonas de mallado, estas pueden entrar en conflicto entre sí y generar errores, por ello se opta por crear un único Face Meshing formado por las dos zonas de recirculación creadas. Como se observa, debido al Face Meshing creado, la zona sólida del capuchón tiene un mallado irregular, no obstante, como en esta zona no van a tomarse ningún tipo de datos, no es importante.

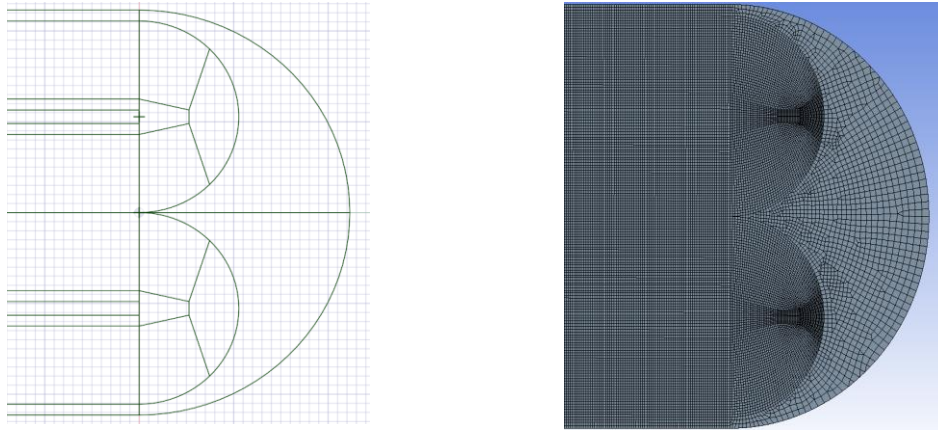


Fig. 52: Diseño y mallado de un tubo con capuchón con bifurcación (Excentricidad 0; Separación=22.3mm).

Capuchón con bifurcación más separación

La segunda alternativa del capuchón con bifurcación tiene una estructura idéntica a la anterior, la variante que existe se encuentra en la zona del tubo y es que, al aumentar la separación esta zona también aumenta tal y como ocurre con el capuchón plano.

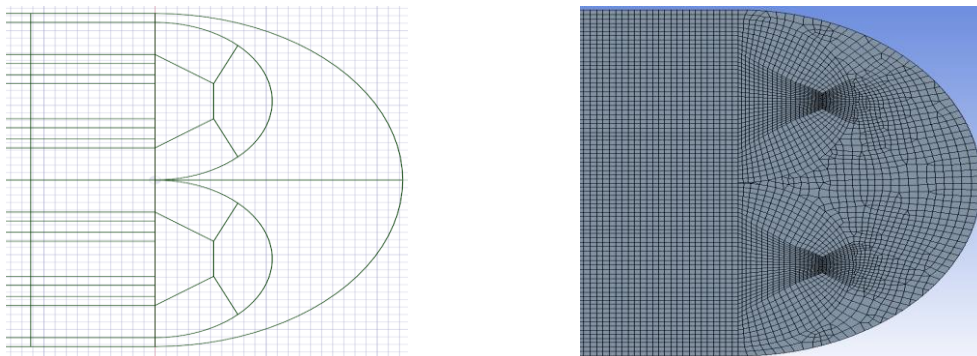


Fig. 53: Diseño y mallado de un tubo con capuchón con bifurcación (Excentricidad 0.25; Separación=11.2mm).

Cada uno de los modelos que se han generado, teniendo en cuenta los distintos tipos de capuchón y las distintas excentricidades tienen un diseño diferente, ya sea por su forma o por las líneas adicionales que han sido creadas para buscar la simetría en el mallado. Este efecto pudiera llegar a generar conflictos a la hora de realizar las simulaciones, por ello es importante delimitar las distintas zonas que componen el diseño, contra más zonas tenga el diseño menos problemas se tienen a la hora de generar la solución y mejores resultados se obtienen.

4.3. Etapa de simulación

En esta etapa se establecen los parámetros necesarios para definir el método resolutorio.

4.3.1. Análisis de sensibilidad

Este ensayo de sensibilidad permite conocer con mayor exactitud el error, o, mejor dicho, la sensibilidad del mallado generado, para ello se hace un estudio en los tres tipos de capuchones para un único valor de excentricidad y de separación. Se aumentará en número de elementos en la zona del capuchón para observar las diferencias de resultados que se obtienen.

Este análisis se realiza para poder comprobar si las diferencias al aumentar el número de elementos en una malla son muy significativas, ya que, aumentar el número de elementos implica incrementar considerablemente el tiempo de simulación. Por otro lado también cabe destacar que el número de celdas en el programa utilizado está limitado a 512000 al tratarse de una versión académica.

Para comprobar si los resultados son correctos, teóricamente el valor de Y^+ obtenido tiene que encontrarse entre 30 y 300. A parte de esta comprobación se realiza una comparativa de los resultados obtenidos a través de Fluent.

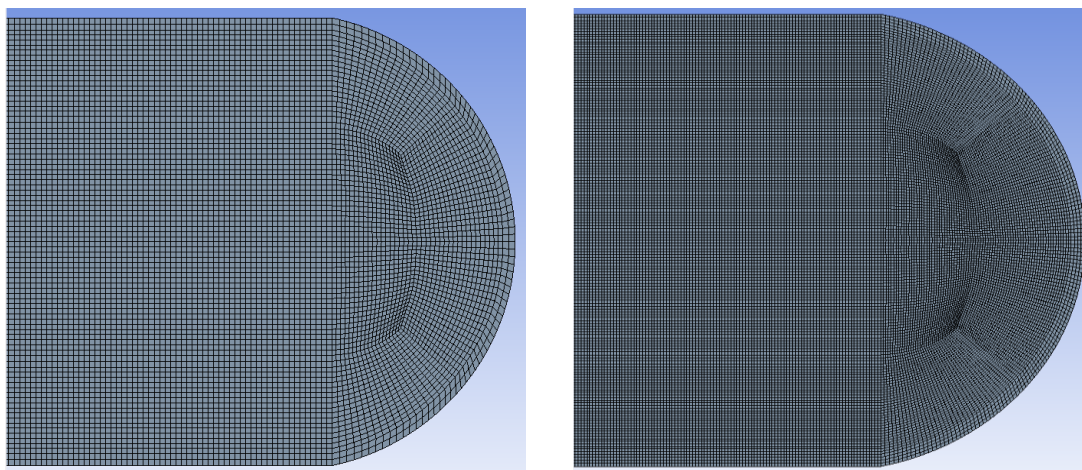


Fig. 54: Ejemplo de mallado del método resolutivo en función del número de elementos.

La siguiente gráfica muestra la variación que se produce en los valores de velocidad para un punto concreto del capuchón, en este caso el punto escogido se encuentra a una distancia X de 10.01 metros e Y 0 metros respecto del origen de coordenadas. El modelo utilizado para este análisis ha sido un capuchón plano con una excentricidad igual a 0, una separación de 16.8 milímetros y como fluido de trabajo agua.

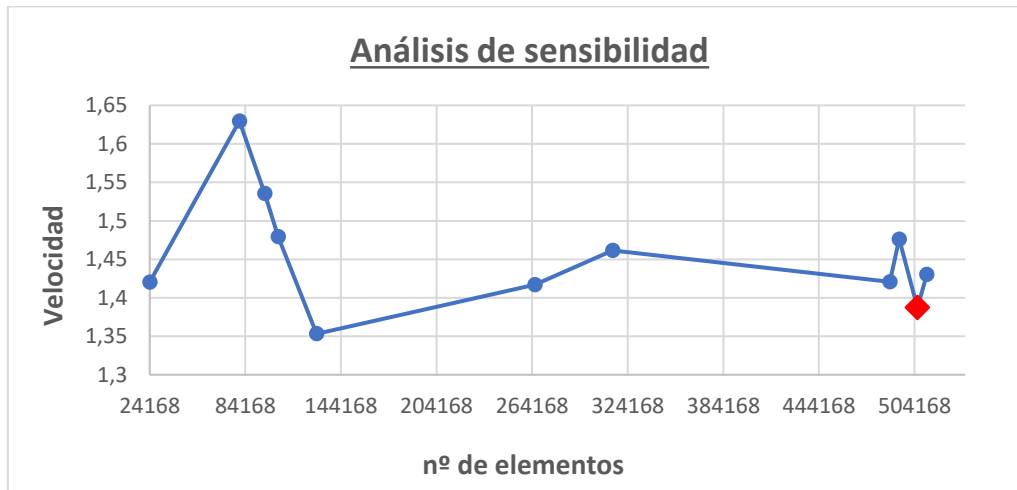


Fig. 55: Análisis de sensibilidad para la estabilización del valor de velocidad en un modelo de capuchón plano.

Se observa como a medida que las celdas y por ende el número de elementos es mayor, dicho valor de velocidad se va estabilizando hasta prácticamente no variar.

Es por ello que en todos los modelos analizados se ha establecido un número de elementos elevado, siendo cercano al valor límite que permite el programa, en el caso analizado previamente el punto marcado en color rojo es el que se ha utilizado en los resultados de este proyecto, ya que, la variación existente con el modelo con mayor número de elementos es de apenas un 4% .

El número de elementos escogido para realizar las simulaciones es aproximado para cada modelo en función de sus características de diseño. Simular una malla con tal cantidad de elementos precisa de un tiempo aproximado de 1 hora por simulación.

4.3.2. Flujo laminar y flujo turbulento

El número de Reynolds es la variable que determina el régimen de un fluido. Si este valor es inferior a 2300 se considera un flujo laminar y si es superior a 4000 se considera un flujo turbulento, entre 2300 y 4000 el flujo se encuentra en estado de transición.

El número de Reynolds se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$Re = \frac{\rho * v * D}{\mu} \quad (18)$$

En los tubos que componen al receptor el régimen del fluido de trabajo debe ser un flujo turbulento, en él las partículas de dicho fluido siguen trayectorias desordenadas, por lo que no pueden predecirse. De esta manera se favorece la transferencia de calor [54].

Selección de modelo turbulento

El programa Fluent permite estudiar diferentes modelos turbulentos dependiendo del estudio a realizar.



Para seleccionar un modelo turbulento hacen falta tener en cuenta una serie de aspectos como pueden ser las propiedades del fluido, la precisión a la hora de obtener resultados, el tiempo requerido para realizar la simulación, etc. Es por ello, que para poder elegir un modelo turbulento se debe conocer qué ofrece cada uno de estos, y cuál es el que mejor conviene a este estudio.

En los siguientes modelos turbulentos las tensiones de Reynolds se obtienen a partir de las ecuaciones de Navier-Stokes y modeladas a partir de una relación linear constitutiva, con un campo de esfuerzos de flujo medio [55].

SPALART-ALLMARAS

Este modelo resuelve una única ecuación de transporte. Es capaz de generar buenos resultados en las capas límite sometidas a gradientes de presión adversos, por ello su uso más genérico es en aplicaciones en aeronáutica, aeroespacial y turbomaquinaria.

No suele utilizarse como modelo general al no dar buenos resultados en "free shear flows" (flujos de cortante).

K- ϵ MODEL

Uno de los principales modelos en los cálculos de flujos, posee una gran precisión a la hora de estudiar flujos turbulentos, no obstante tiene baja precisión en la separación de la capa límite y con gradientes de presión adversos.

Este modelo cuenta con dos ecuaciones de transporte adicionales que permiten interpretar mejor las propiedades turbulentas del flujo.

La primera de las variables de transporte de este modelo (K) es la energía cinética turbulenta, encargada de determinar la energía que se produce en la turbulencia. La segunda variable (ϵ) determina el nivel de turbulencia.

Habitualmente utilizado en flujos que se separan de superficies suaves, pero no usado con efectos aerodinámicos externos.

Se suele combinar con otros dos modelos para ofrecer mayores precisiones:

- Enhanced Wall Treatment EWT- ϵ (two-layer approach)
- ML- ϵ

K- ω MODEL

Resuelve también dos ecuaciones de transporte adicionales y además ofrece muchas más ventajas que el modelo K- ϵ . Puede ser integrada sin añadir términos adicionales a través de la capa viscosa.

La primera de sus variables (K) es la energía cinética de la turbulencia, al igual que en el modelo anterior, mientras que la segunda variable encargada de determinar la escala de la turbulencia ahora es ω .



Este modelo además es mejor a la hora de prevenir gradientes de presión en las capas límite, el problema es la extrema sensibilidad de la solución dependiendo de los valores de k y ω fuera de la capa límite, por ello no suele ser muy recomendable en Ansys Fluent.

REYNOLD STRESS MODEL

Es el modelo más completo ya que tiene en cuenta efectos difíciles de tratar por los modelos turbulentos como puede ser el efecto de la estabilización frente a fuertes rotaciones, por este motivo se requiere un gran tiempo para su resolución, por lo que generalmente queda restringido para flujos con elevada rotación y giro (tornados pe).

Funciones de pared

La mayoría de modelos turbulentos no son capaces de resolver correctamente los conflictos que se producen en las zonas de la capa límite, es por ello que algunos de estos modelos utilizan funciones de pared adicionales que facilitan y permiten su correcta resolución.

La función Standard está basada en el trabajo de Launder and Spalding y son más utilizadas a nivel industrial [56].

La función Scalable produce buenos resultados para refinamientos de la malla más arbitrarios, por lo que, no se reduce tanto la precisión como sí ocurre con el modelo Standard, por ello esta función de pared es la que se utiliza para el modelo turbulento utilizado.

Las funciones de pared presentan la ventaja de que para resolver dichos conflictos previos necesitan un menor número de celdas que los modelos turbulentos que no hacen uso de estas. Las funciones de pared se rigen por la idea de que la distribución de velocidades en una zona muy cercana a la pared es similar para casi todos los fluidos turbulentos.

Uno de los parámetros más importantes es la distancia de pared, conocida como Wall y^+ .

$$y^+ = \frac{y * u_T}{\nu} \quad (19)$$

Donde:

- y^+ : Wall y^+
- y : Distancia a la pared más cercana
- u_T : Velocidad de fricción en la zona cercana a la pared
- ν : Viscosidad cinemática

Para obtener buenos resultados en los modelos que utilizan funciones de pared, es recomendado que los valores obtenidos de y^+ se encuentren en el siguiente intervalo; $30 < y^+ < 300$, ya que en caso de ser demasiado bajo se considera un modelo no válido, y si es excesivamente alto, los resultados obtenidos pueden ser que no sean los correctos.

El valor de y^+ se utiliza para conocer el tamaño mínimo o máximo que deben tener las celdas que componen el mallado [57], [58].

De todos los modelos turbulentos definidos y tras conocer el uso de las funciones de pared se analizan 3 de ellos ya que se consideran los más óptimos para el objetivo de este proyecto.

- **REYNOLD STRESS MODEL**
- **k- ω MODEL**
- **K- ϵ MODEL**

La siguiente tabla comparativa muestra la variación de resultados existente a la hora de escoger un modelo turbulento u otro. Unido al análisis de estos modelos turbulentos se va a realizar la comprobación entre un análisis planar y un análisis de axil simetría.

Para esta comparativa, se va a analizar el mismo capuchón semicircular (Excentricidad=0; Separación=16.8mm), utilizando agua como fluido de trabajo y para un total de 1200 iteraciones.

TABLA 4: RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE ANSYS FLUENT DE LOS DISTINTOS TIPOS DE FLUJOS TURBULENTOS.

	K-ω	Reynold stress	K-ϵ
Presión estática máxima (Pa)	320772.8	300964.4	308725.5
Velocidad máxima (m/s)	13.21216	13.84218	12.18981
Presión promedio en X=10m (Pa)	236303.36	220351.59	227518.9
Velocidad promedio en X=10m (m/s)	6.1810685	6.1296046	6.0897299
Pérdida de carga promedio (Pa)	182117.83	170875.65	175279.74
Velocidad promedio entre la entrada y la salida (m/s)	5.6781235	5.6781324	5.6781379
Y+	179.657	180.874	197.0672
Nº de Reynolds	11880.97	12959.04	-

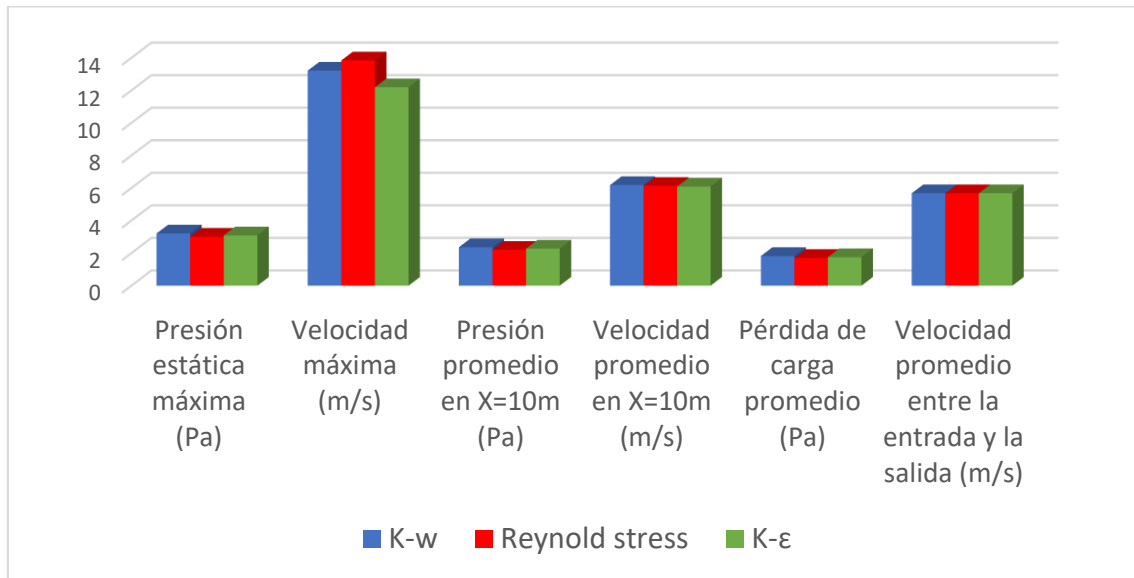


Fig. 56: Diagrama de barras comparativo entre los valores de estudio para distintos modelos turbulentos.

Finalmente se opta por realizar los análisis con el modelo turbulento Reynolds Stress, ya que, al contrario que el resto de los casos donde únicamente resuelve dos ecuaciones, este método resuelve cinco ecuaciones, mejorando exponencialmente los resultados obtenidos pero a costa de un incremento en el tiempo de simulación.

4.4. Características simulación CFD

Por último se van a tratar los criterios utilizados para la simulación de todos los modelos que han sido estudiados.

Se comienza utilizando un modelo resolutivo basado en la presión en lugar de la densidad, ya que trata flujos incompresibles de baja velocidad, donde la densidad se mantiene constante a lo largo de todo el tramo analizado (su volumen no varía) y la presión no es función de la densidad ni de la temperatura. De esta manera el campo de velocidades es obtenido a partir de las ecuaciones de momento y el campo de presiones a partir de las ecuaciones de momento y continuidad.

Se establece el criterio de analizar modelos planos en 2D. A partir de un estudio realizado previamente se comparan los resultados obtenidos para un tubo simple de tres formas diferentes; Modelado en 3D, en 2D y un modelo 2D que presenta un eje de axilsimetría.

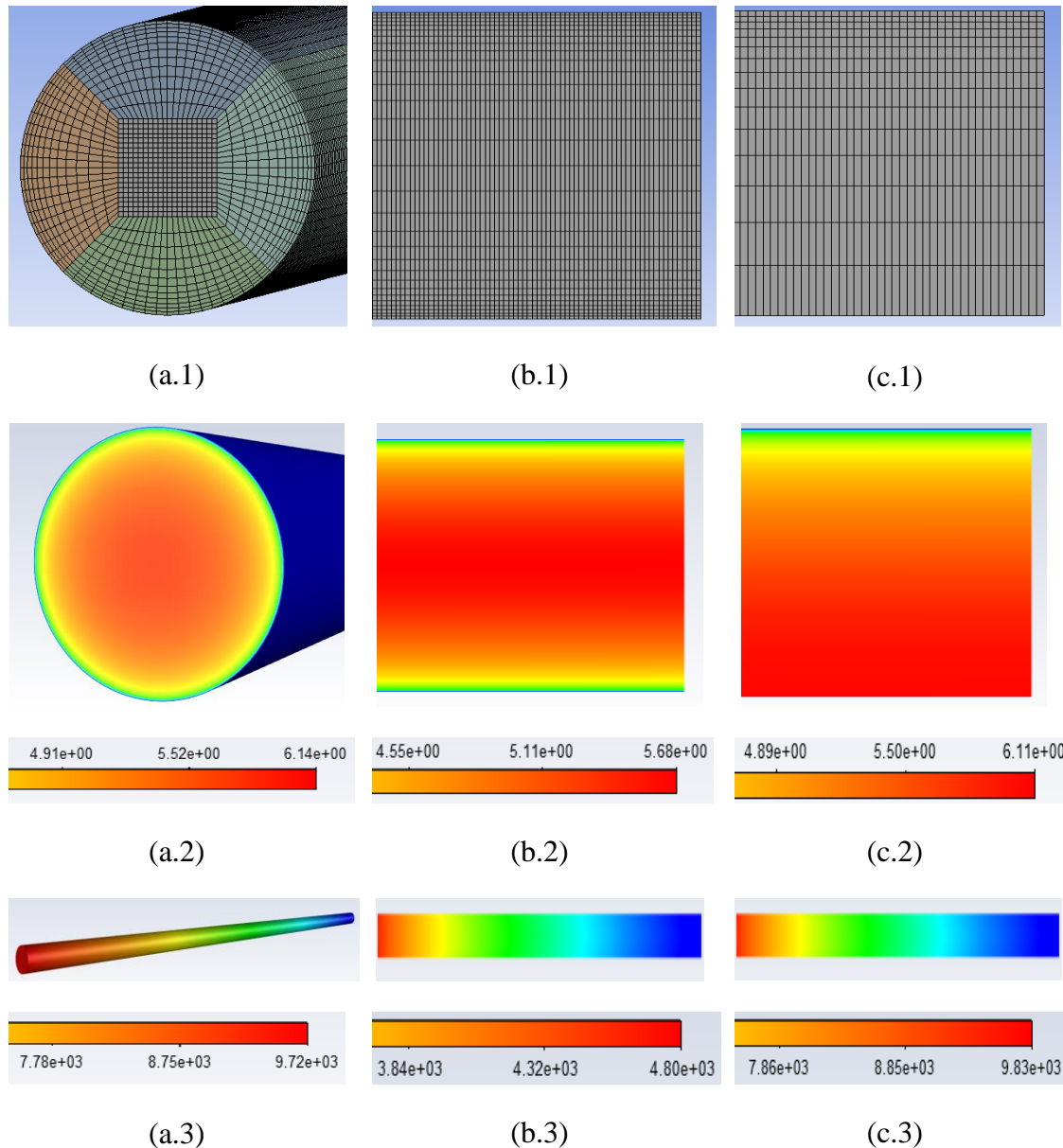


Fig. 57: Mallado (a.1), contorno de velocidades m/s (a.2) y contorno de presiones Pa (a.3) de un modelo 3D. Mallado (b.1), contorno de velocidades m/s (b.2) y contorno de presiones Pa (b.3) de un modelo plano 2D. Mallado (c.1), contorno de velocidades m/s (c.2) y contorno de presiones Pa (c.3) de un modelo 2D con un eje de axilsimetría.

Los resultados obtenidos denotan una similitud en los análisis para el contorno de velocidades de los tres modelos, no obstante parece apreciarse en el contorno de presiones que el modelo plano en 2D (b.3) presenta un valor de presión inferior a los otros modelos. Pese a ello, el contorno de presiones se mide en Pascales, lo que quiere decir que la variación existente en bares es de apenas 0.05 bares.

Con este sencillo estudio se puede establecer que en un principio los resultados que se obtienen, independientemente del modelo analizado no presentan grandes variaciones.

A partir del modelo turbulento Reynolds Stress se realizan los análisis con una función de pared para que los resultados en las zonas cercanas a la pared sean más precisos.



El material de los tubos es indiferente ya que sólo se analizan los efectos del fluido por ello se ha seleccionado aluminio, material que viene por defecto.

Cell Zones: Se definen las zonas donde tienen que resolverse las ecuaciones del modelo turbulento. En estas celdas se tiene que determinar el material con el cuál van a ser analizadas, en el caso de este proyecto se diferencian tres zonas, las dos primeras delimitan el fluido que se analiza (Zona Fluid1 y Fluid2 definidas previamente), la tercera de estas zonas hace referencia al material de las paredes del tubo, en este caso aluminio.

Esta opción permite definir otras variables como zonas de porosidad por ejemplo pero que no van a tenerse en consideración.

Condiciones de contorno: Desde el mallador se han definido ciertas zonas para poder definir las condiciones de zona de fluido, zona sólida, entrada y salida, etc.

- Wall: Formado por las paredes sólidas del tubo bayoneta.
- In wall: Es la línea que separa la pared del tubo anular y capuchón del fluido.
- Ext wall: Es la línea que compone la parte externa de la pared anular y del capuchón.
- Esp: Es el espesor del tubo circular, esta zona cobra mayor importancia en la segunda alternativa del capuchón con bifurcación para delimitar el final de dicho tubo.
- Fluid1/ Fluid2: El fluido se ha delimitado en dos zonas diferentes, el fluido que circula por el tubo (fluid 1) y el fluido que se encuentra únicamente en la zona del capuchón (fluid 2).
- Ti int: La línea que separa la pared del tubo circular del fluido de salida.
- Ti ext: La línea que separa la pared del tubo circular del fluido de entrada.
- Tapa: Son los espesores del inicio de los tubos circular y anular.
- Inlet: Zona por la que entra el fluido.
- Outlet: Zona por la que sale el fluido.

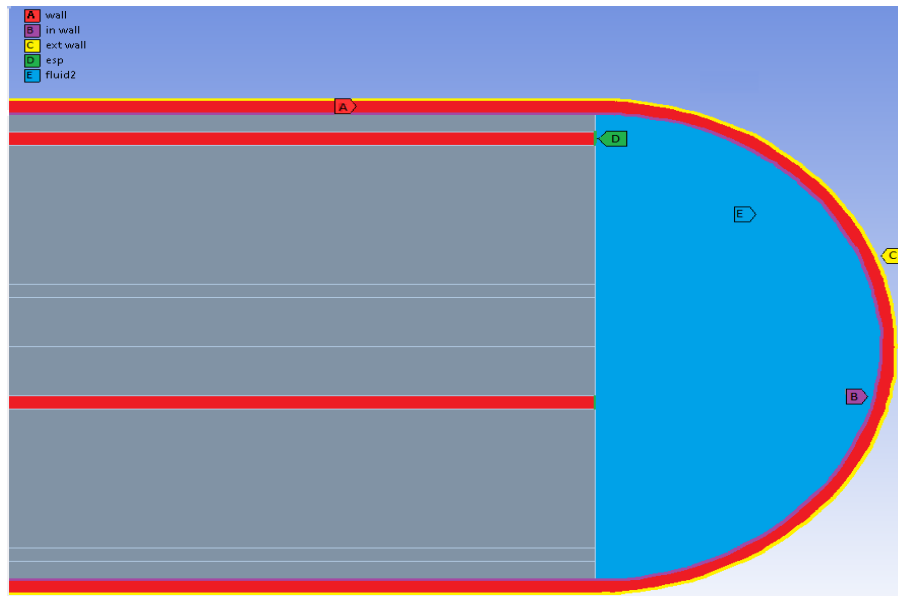


Fig. 58: Composición de las zonas de un tubo bayoneta 1 (Excentricidad 0.4).

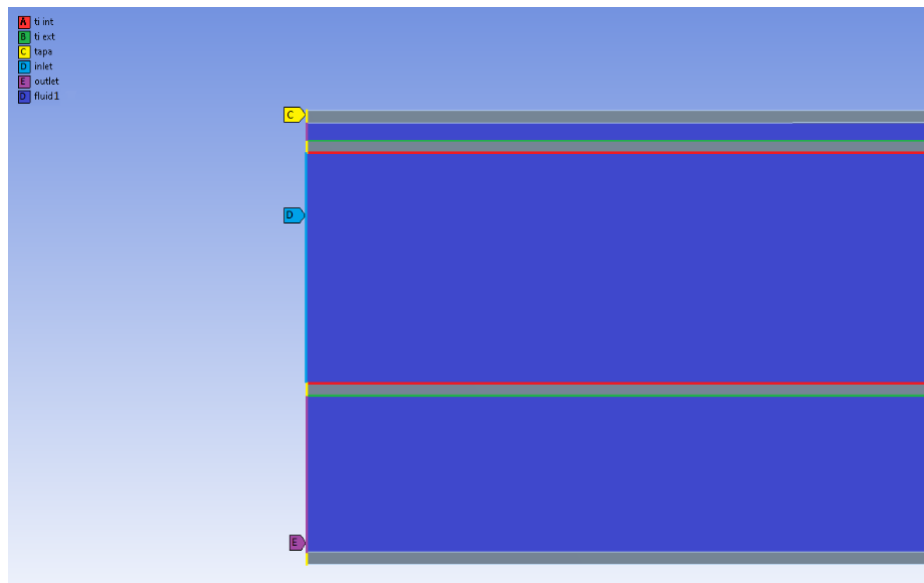


Fig. 59: Composición de las zonas de un tubo bayoneta 2 (Excentricidad 0.4).

Para la zona de la entrada (Inlet) se ha establecido un valor de velocidad inicial de 5m/s.

El método resolutivo “High Order Term Relaxation” genera valores más precisos a costa de aumentar el tiempo de simulación.

Por último, para que la solución de la simulación converja en un tiempo mayor de cara a obtener mejores resultados se establece un criterio de convergencia en todos los residuos del modelo turbulento de $1 \cdot 10^{-6}$.

4.5. Casos estudiados

Una vez definidos todos los aspectos necesarios para la obtención de resultados se pasa a la etapa de generación de resultados, previo a ello se define el siguiente esquema y cuadro resumen con todos los casos que van a ser analizados.

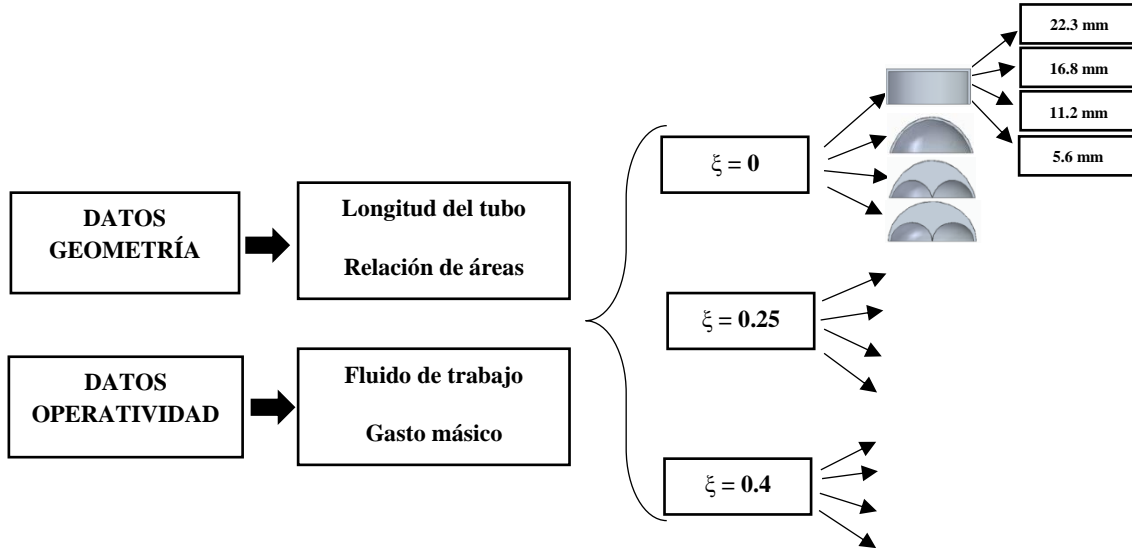


Fig. 60: Esquema resumen de los diferentes modelos analizados.

TABLA 5: TABLA RESUMEN DE LOS DIFERENTES MODELOS ANALIZADOS.

Tipo de capuchón	Capuchón plano				Capuchón circular				Capuchón con bifurcación				Capuchón con bifurcación y separación			
Separación	5.6	11.2	16.8	22.3	5.6	11.2	16.8	22.3	5.6	11.2	16.8	22.3	5.6	11.2	16.8	22.3
Excentricidad	0		0.25	0.4	0		0.25	0.4	0		0.25	0.4	0		0.25	0.4
Fluidos	Agua		Sodio líquido		Agua		Sodio líquido		Agua		Sodio líquido		Agua		Sodio líquido	
	Sal solar		LBE		Sal solar		LBE		Sal solar		LBE		Sal solar		LBE	
Simulaciones realizadas	48				48				48				48			
Total	192															

CAPÍTULO V RESULTADOS

CHAPTER V RESULTS

Tal y como se indica en el capítulo previo se establece un criterio de convergencia de $1 \cdot 10^{-6}$ de esta forma la simulación tarda más en completarse y los resultados que se obtienen son más exactos.

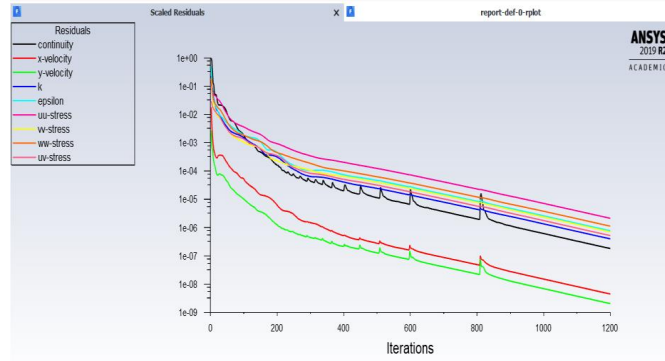


Fig. 61: Gráfico de residuos generados para una simulación con modelo turbulento Reynolds Stress.

No obstante se han realizado varias comprobaciones de cara a asegurar en mayor grado que los resultados que se han obtenido son correctos.

5.1. Validación previa de los resultados

La primera de ellas es la comprobación de si el valor de velocidad a la salida se vuelve constante en función del número de iteraciones.

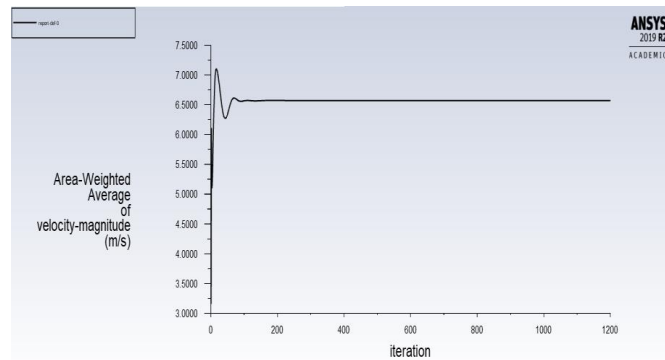


Fig. 62: Estabilización del valor de velocidad a la salida del tubo.

$$\Delta P_{total(x=0)} = P_2 - P_1 = \Delta P_{circular} + \Delta P_{anular} + \Delta P_{codo(x=10)} \quad (20)$$

La expresión previa define el valor de la pérdida de carga total que existe en el tubo está dividida en tres zonas distintas. Por medio del código definido en Matlab se obtienen los valores de la pérdida de carga total y de la pérdida de carga del codo.



Fig. 63: Zona circular



Fig. 64: Zona anular



Fig. 65: Zona codo (Capuchón).

Por medio de un método analítico se pretende calcular la pérdida de carga en el tramo circular y en el tramo anular y corroborar que se cumple que la pérdida de carga total es la suma de la pérdida de carga obtenida en las tres zonas.

La pérdida de carga se obtiene sea cual sea la zona de estudio mediante la ecuación de Bernoulli:

$$\Delta P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \left[\frac{L}{D} * \lambda + k \right] \quad (21)$$

Las pérdidas secundarias van a presentar valores muy bajos por lo que van a ser consideradas como despreciables ($k=0$).

El factor de fricción se realiza por medio de un método iterativo mediante la ecuación de Colebrook.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \left[\frac{\epsilon/D}{3.71} + \frac{2.51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} \right] \quad (22)$$

Se establece un efecto de rugosidad dominante simplificando la ecuación a:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \left[\frac{\epsilon/D}{3.71} \right] \quad (23)$$

El valor de la rugosidad absoluta para el aluminio según [59] varía entorno 0.015-0.06mm, por lo que se coge un valor medio de 0.0375mm.

Por medio del diagrama de Moody (Ver Anexo III) sacamos el valor de Reynolds y se introduce dicho valor en la ecuación tal para obtener un nuevo valor para el factor de fricción. Se repite este proceso iterativo hasta que el valor del factor de fricción permanezca constante.

ΔP circular

El tramo circular es el más sencillo de analizar ya que el valor de velocidad es el mismo que se ha establecido para realizar todas las simulaciones.

$$v_{circular} = 5 \text{ m/s}$$

La longitud del tramo es de diez metros, que es la distancia que hay desde la zona de entrada hasta la zona del codo ($X=10$ metros). El diámetro del tramo circular es el diámetro interno del tubo interior, es decir:



$$d_i = 22.6 \text{ mm}$$

Al tratarse de agua el valor de la densidad es de 998.2 kg/m^3

Por último se calcula el factor de fricción.

Iteración 1

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \left[\frac{1.66 \cdot 10^{-3}}{3.71} \right] \quad (23)$$

$$\lambda = 0.02229$$

$$\frac{1}{0.02229} = -2 \cdot \log \left[\frac{1.66 \cdot 10^{-3}}{3.71} + \frac{2.51}{Re \cdot \sqrt{0.02229}} \right] \quad (22)$$

$$Re = 1.4 \cdot 10^7$$

Iteración 2

$$\lambda = 0.0223$$

$$Re = 1.6 \cdot 10^7$$

Iteración 3

$$\lambda = 0.0223$$

Finalmente:

$$\Delta P_{circular} = \frac{1}{2} \cdot 998.2 \cdot 5^2 \left[\frac{10}{22.6 \cdot 10^{-3}} \cdot 0.0223 \right] \quad (21)$$

$$\Delta P_{circular} = 123118.7 \text{ Pa} = 1.23 \text{ bar}$$

ΔP anular

En este caso el valor del diámetro ya no va a ser el de la zona circular, ya que, lo que se está analizando ahora es un tubo anular, por lo que se tiene que calcular el diámetro hidráulico:

$$D_h = D_i - d_e = 17.2 \text{ mm} \quad (24)$$

Al tratarse de un sistema cerrado en estado estacionario el balance de masa permanece constante entre la zona circular y la zona anular.

$$\dot{m}_c = \dot{m}_a \quad (25)$$

$$\rho_c \cdot v_c \cdot A_c = \rho_a \cdot v_a \cdot A_a$$

De esta igualdad se puede obtener el valor de velocidad del tramo anular conociendo a su vez que el valor de la densidad permanece constante, por lo que puede eliminarse de la expresión previa quedando:

$$v_a = v_c \cdot \frac{\frac{\pi}{4} \cdot d_i^2}{\frac{\pi}{4} \cdot (D_i^2 - d_e^2)} \quad (26)$$

La velocidad a la entrada se ha definido previamente con un valor de 5 m/s y haciendo uso de los valores geométricos del tubo obtenidos previamente el valor de velocidad en el tramo anular que se obtiene es de:

$$v_a = 2.21 \text{ m/s}$$

La longitud del tramo anular es la misma que la del tramo circular (10m)

Por último se calcula el factor de fricción.

Iteración 1

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \left[\frac{2.18 \cdot 10^{-3}}{3.71} \right] \quad (23)$$

$$\lambda = 0.02395$$

$$\frac{1}{0.02395} = -2 \cdot \log \left[\frac{2.18 \cdot 10^{-3}}{3.71} + \frac{2.51}{Re \cdot \sqrt{0.02395}} \right] \quad (22)$$

$$Re = 1.69 \cdot 10^6$$

Iteración 2

$$\lambda = 0.024$$

$$Re = 1.34 \cdot 10^6$$

Iteración 3

$$\lambda = 0.0224$$

Finalmente:

$$\Delta P_{anular} = \frac{1}{2} \cdot 998.2 \cdot 2.21^2 \left[\frac{10}{17.2 \cdot 10^{-3}} \cdot 0.0224 \right] \quad (21)$$

$$\Delta P_{anular} = 31746.19 \text{ Pa} = 0.317 \text{ bar}$$

Para el caso de un capuchón plano y una separación de 5.6mm.

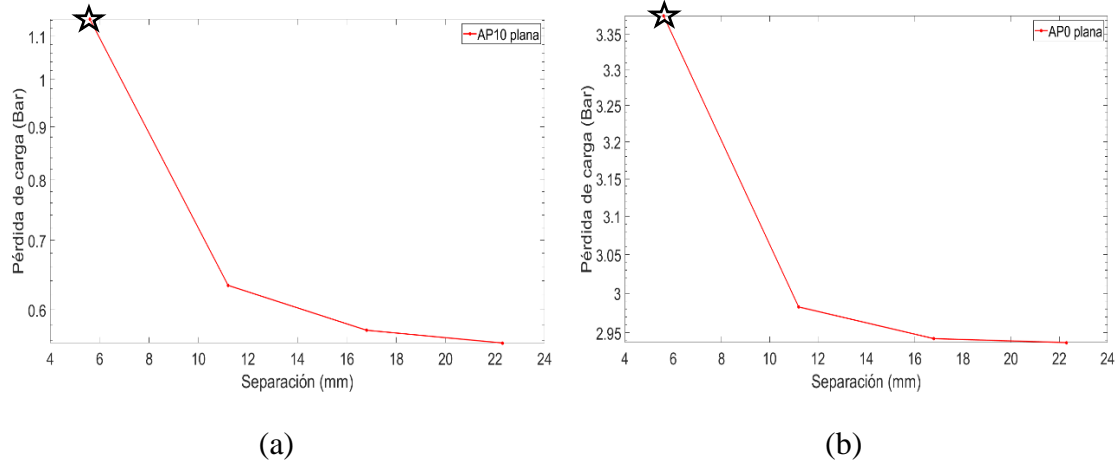


Fig. 66: Valor de la pérdida de carga para un capuchón plano y una separación de 5.6mm. (a) Pérdida de carga en el capuchón. (b) Pérdida de carga total en el tubo.

$$\Delta P_{total(x=0)} = P_2 - P_1 = 1.23 + 0.317 + 1.15 = 2.70 \text{ bar} \quad (20)$$

$$\Delta P_{total}(\text{matlab}) = 3.4 \text{ bar}$$

Para el caso de un capuchón con bifurcación y una separación de 16.8mm.

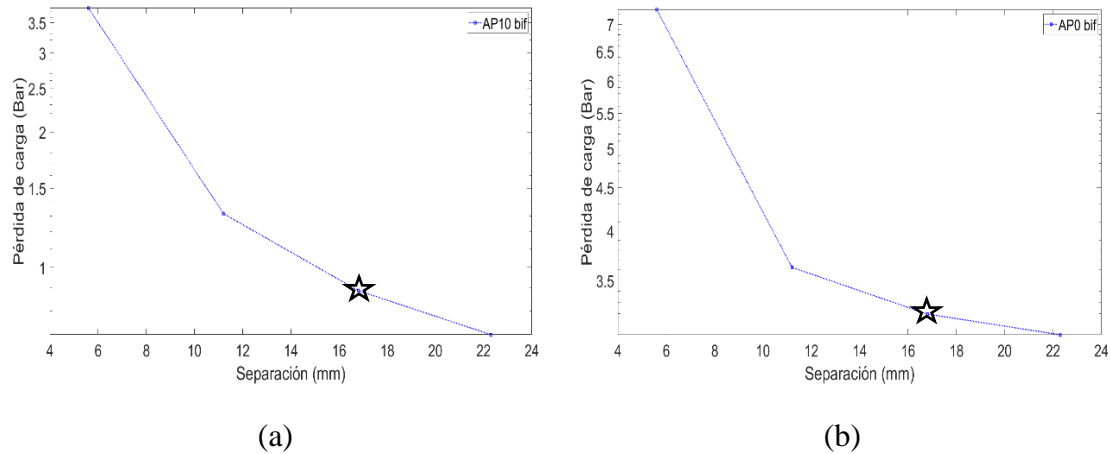


Fig. 67: Valor de la pérdida de carga para un capuchón con bifurcación y una separación de 16.8mm. (a) Pérdida de carga en el capuchón. (b) Pérdida de carga total en el tubo.

$$\Delta P_{total(x=0)} = P_2 - P_1 = 1.23 + 0.317 + 0.95 = 2.5 \text{ bar} \quad (20)$$

$$\Delta P_{total}(\text{matlab}) = 3.2 \text{ bar}$$

La media de error cometido se encuentra alrededor de un 25%, valor que parece muy elevado, pero se están hablando de diferencias inferiores a 1 bar de presión.

Tras estas comprobaciones se realiza un estudio que tiene en cuenta todos los aspectos descritos previamente.

5.2. Estudio de la pérdida de carga en función del tipo de capuchón

Se analiza el caso de cómo influye la pérdida de carga según el modelo de capuchón para distintas separaciones. En este análisis el fluido de trabajo es agua y los tubos presentan una $\xi=0$.

Se presenta un contorno de velocidades para los distintos capuchones para observar la influencia de cada uno de los modelos.

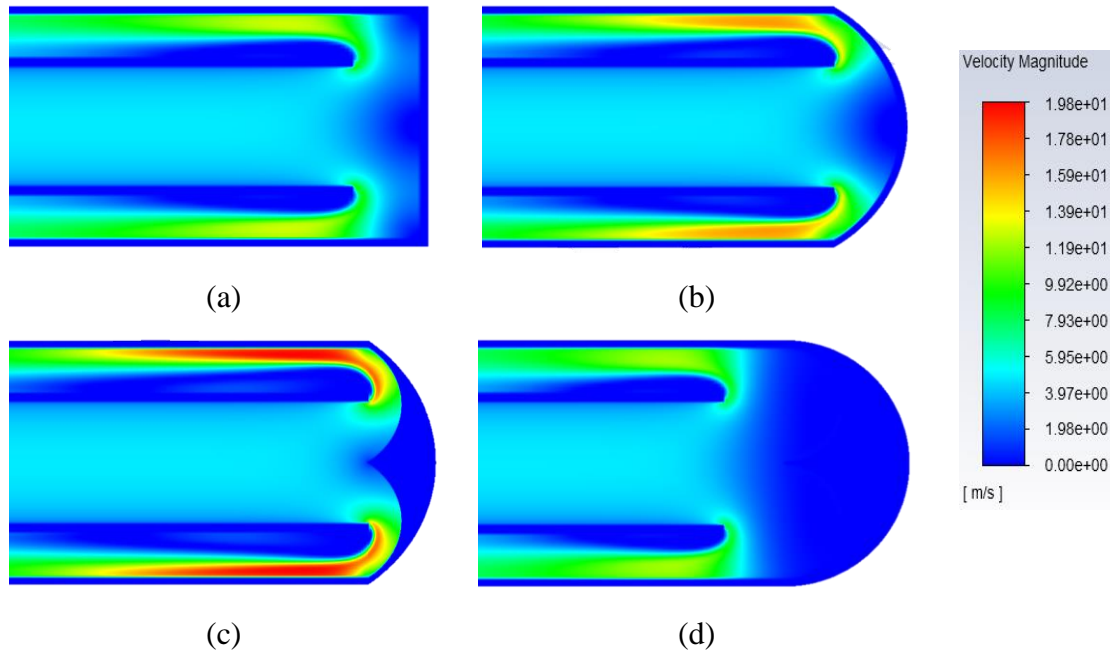


Fig. 68: Contornos de velocidades para distintos modelos de capuchón utilizando sal solar como fluido de trabajo $\xi=0$. Sep. 11.2mm. (a) Capuchón plano; (b) Capuchón semicircular; (c) Capuchón con bifurcación; (d) Capuchón con bifurcación y separación adicional.

Para poder analizar todas las separaciones analizadas se hace uso de las siguientes gráficas.

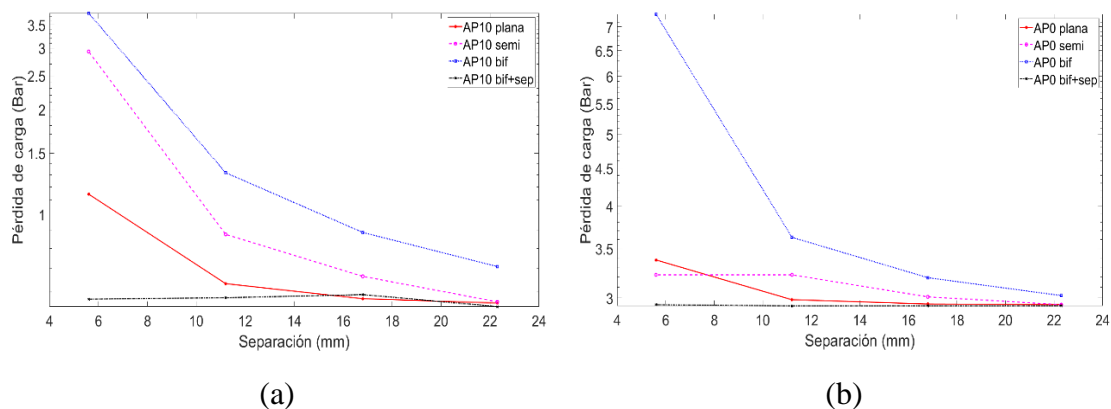


Fig. 69: Pérdida de carga en función del tipo de capuchón. Fluido de trabajo agua $\xi=0$. (a) Pérdida de carga en el capuchón. (b) Pérdida de carga total en el tubo.

A medida que aumenta la separación el valor de la pérdida de carga va disminuyendo en todos los casos. Los capuchones plano y la segunda variante del capuchón con bifurcación presentan los valores de pérdida de carga más bajos de todos los modelos analizados, no obstante, todos los modelos presentan una pérdida de carga en el capuchón (zona del codo) bastante bajos y es la primera variante del capuchón con bifurcación la única que presenta unos valores de pérdida de carga relativamente elevados con respecto al resto de capuchones.

5.3. Estudio de la pérdida de carga en función de la excentricidad

Una vez visto como varían los resultados en función del tipo de capuchón se comprueba el efecto del valor de excentricidad entre los tubos, para ello se analizan dos capuchones distintos utilizando el mismo fluido de trabajo, agua.

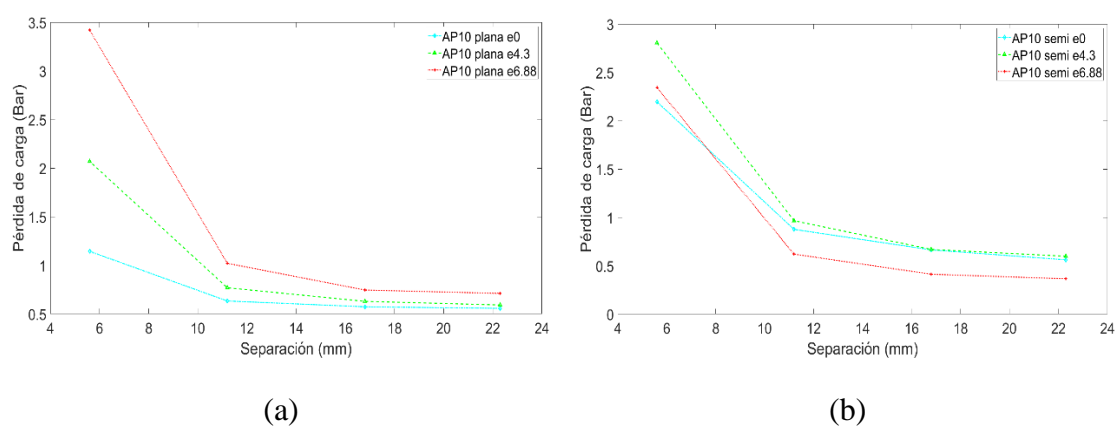


Fig. 70: Pérdida de carga en el capuchón (codo) en función del valor de excentricidad. Fluido de trabajo agua. (a) Capuchón plano. (b) Capuchón semicircular.

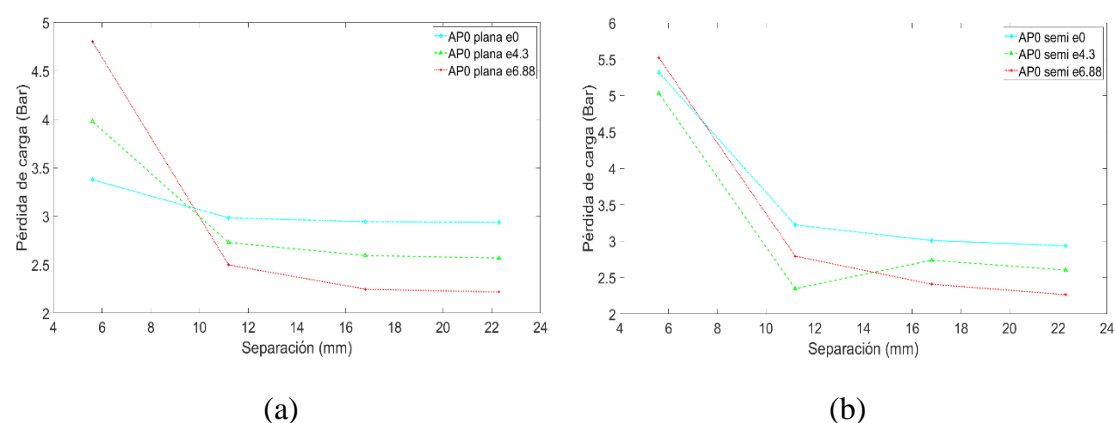


Fig. 71: Pérdida de carga en el tubo en función del valor de excentricidad. Fluido de trabajo agua. (a) Capuchón plano. (b) Capuchón semicircular.

Tal y como se muestra en el estudio de Miguel Ángel Montero Avilés [39] la distribución de la velocidad axial es simétrica, obteniendo su valor máximo en un radio intermedio entre ambos tubos sea cual sea su dirección angular, no obstante, en los casos que aparece

excentricidad esta axisimetría desaparece y se observa como en la parte trasera de la sección anular la velocidad axial disminuye y es en la parte delantera donde se alcanza el máximo de velocidad, lo que se traduce en una ligera disminución de la pérdida de carga tal y como se muestra en el artículo publicado por Rafael Pérez Álvarez [53].

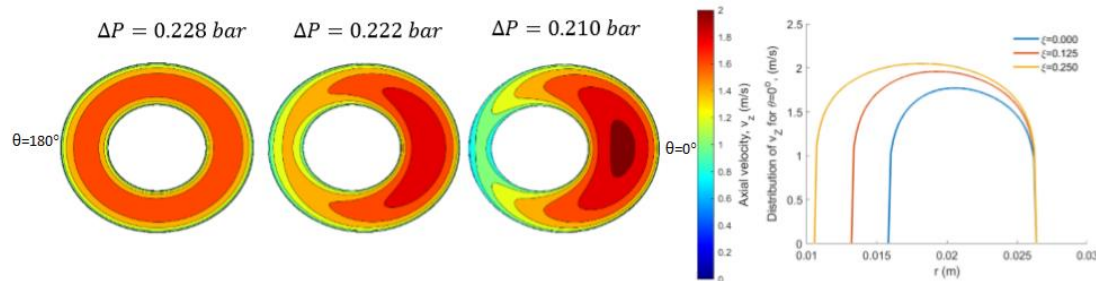


Fig. 72: Contorno de velocidad axial en función de la excentricidad del tubo utilizando como fluido Sal Solar [53].

Este contorno de velocidades puede apreciarse a su vez en el contorno de velocidades que se reproduce en el capuchón independientemente del fluido de trabajo analizado.

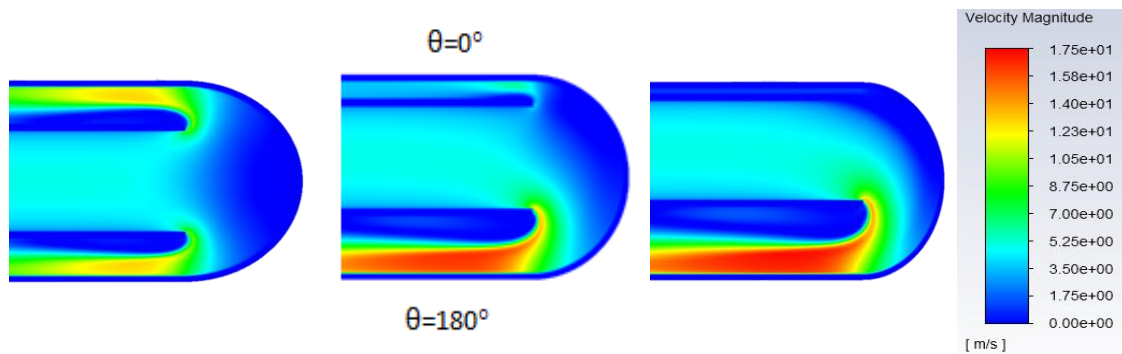


Fig. 73: Contorno de velocidades en un capuchón semicircular en función de la excentricidad utilizando como fluido Agua.

5.4. Estudio de la pérdida de carga en función del fluido de trabajo

El tipo de fluido de trabajo es el último aspecto a tener en cuenta en este proyecto de cara a optimizar la eficiencia de los tubos.

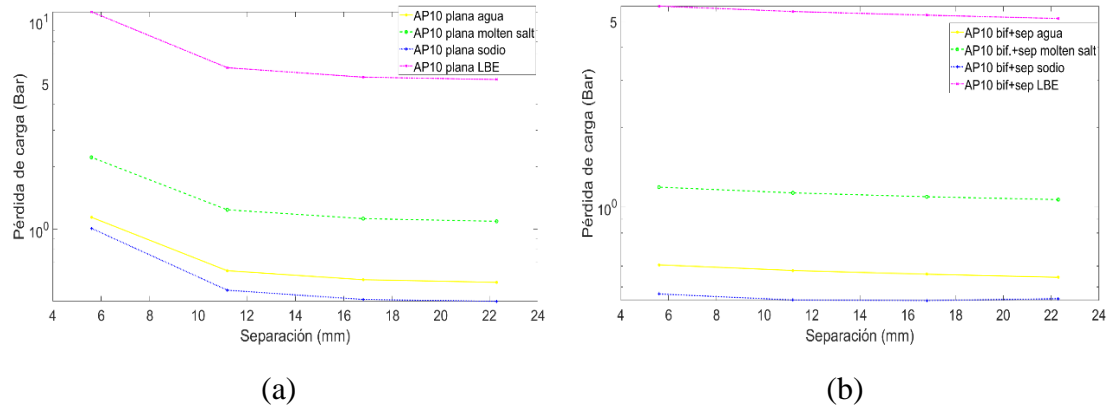


Fig. 74: Pérdida de carga en el capuchón (codo) en función del fluido de trabajo para una $\xi=0$. (a) Capuchón plano. (b) Capuchón con bifurcación y separación.

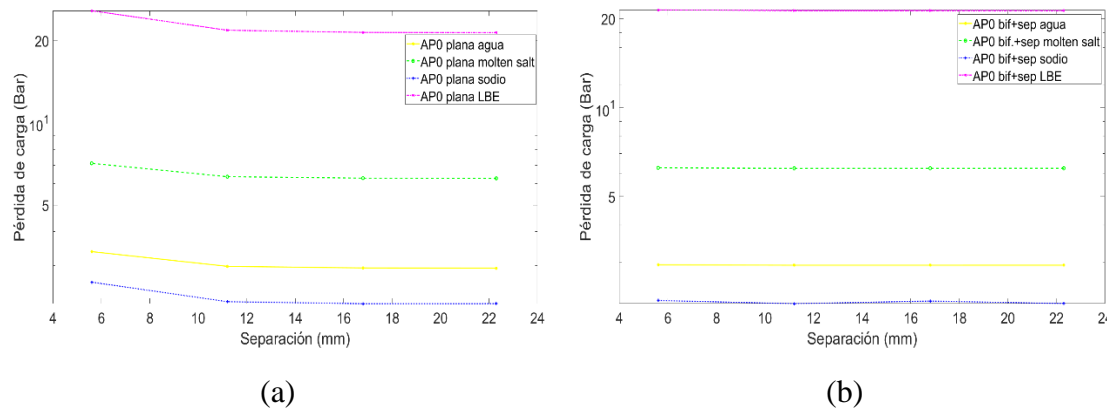


Fig. 75: Pérdida de carga en el tubo en función del fluido de trabajo para una $\xi=0$. (a) Capuchón plano. (b) Capuchón con bifurcación y separación.

El LBE es el fluido cuyas propiedades son más deficientes en comparación al resto de fluidos de trabajo siendo el sodio aquel cuyas propiedades de trabajo son más óptimas incluso que el agua líquida. El sodio a su vez genera unos resultados ligeramente más desfavorables que los anteriores pero su diferencia con respecto al LBE sigue siendo elevada.

5.5. Casos adicionales

Tal y como se ha podido observar previamente el valor de la pérdida de carga presenta una tendencia a reducirse a medida que la separación del capuchón es mayor, sin embargo, ¿Qué pasa si esta separación es lo suficientemente grande?, ¿Y si por lo contrario el capuchón está muy pegado al extremo del tubo bayoneta?

Adicionalmente se realizaron una serie de simulaciones para tratar de esclarecer dichas cuestiones.

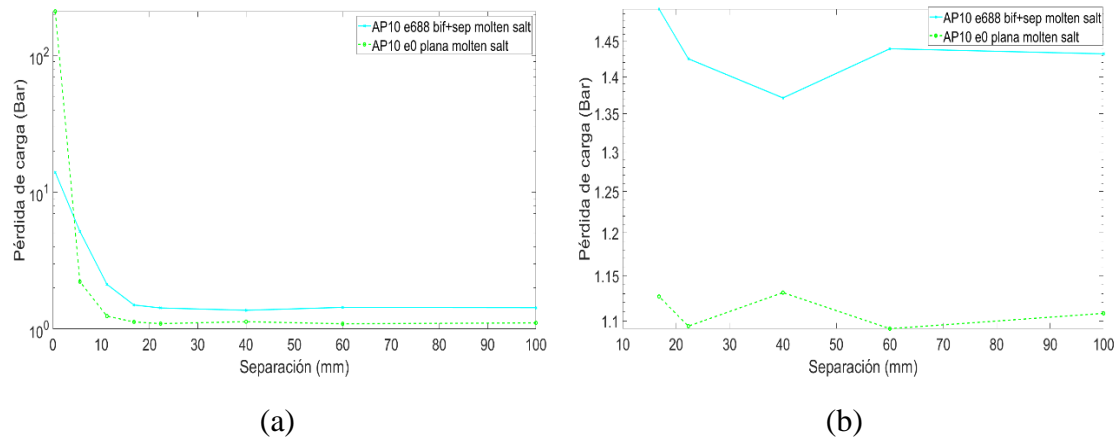


Fig. 76: Pérdida de carga para un mayor número de separaciones. (a) Todas las separaciones analizadas. (b) Zoom a las separaciones más grandes.

Se puede apreciar como al dejar una separación mínima entre el límite del tubo bayoneta y el capuchón se produce una sobrepresión muy elevada en comparación con el resto de las separaciones por lo que la pérdida de carga aumenta exponencialmente.

Si se observa con mayor detalle lo que sucede con la pérdida de carga para valores de separación más elevados se obtiene un valor mínimo de pérdida de carga a cierto valor de separación y posteriormente la pérdida de carga se estabiliza.

Puede observarse dicho efecto en los siguientes contornos de velocidad donde a partir de cierto valor de separación la zona del capuchón sigue la misma tendencia.

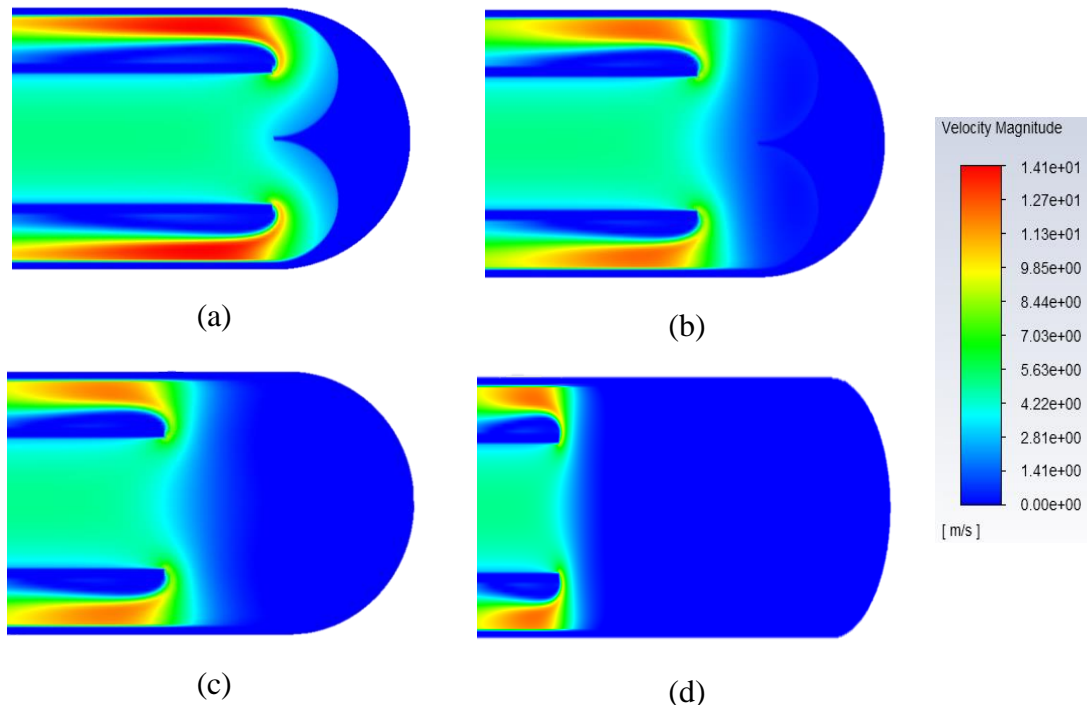


Fig. 77: Contornos de velocidades para distintas separaciones y un capuchón con bifurcación y separación. Fluido de trabajo Sal solar(a) Sep. 0.5mm; (b) Sep. 11.2mm; (c) Sep. 22.3mm; (d) Sep. 100mm.



CAPÍTULO VI PRESUPUESTO DEL PROYECTO

CHAPTER VI PROJECT BUDGET

A continuación se plantea una estimación de los posibles costos que supone la realización de este proyecto, únicamente basado en la investigación y análisis. Se va a tomar la hipótesis aproximada de que el tiempo de duración del proyecto es de un año.

6.1. Costos directos

Aquellos costes que están directamente relacionados con la realización del proyecto, es decir, los costes relacionados con el material de trabajo, personal de trabajo y mano de obra.

6.2. Costos indirectos

Permiten y son necesarios para la actividad diaria del proyecto, pero no son identificadas de igual manera que los costes directos, en ellos se incluyen alquileres, desplazamientos, internet entre otros.

Para la obtención de los costos de software y formación se han tenido en cuenta los precios actuales del mercado y licencias completas, ya que las versiones académicas que se han utilizado son gratuitas y no tienen costo para estudiantes.

La mano de obra y sus costos se obtienen mediante la siguiente ecuación.

$$Coste\ total = Coste\left(\frac{\text{€}}{\text{hora}}\right) \cdot n^{\circ}\text{ de horas} \quad (27)$$

- Coste mano de obra = 8 (€/hora).
- Número de horas empleadas en un año = 1095 (h).

Los costos de tutelaje son aquellos derivados del tiempo empleado en tutorías y se calculan de la misma de forma que la mano de obra.

- Coste tutelaje = 15 (€/hora).
- Número de horas dedicadas con el tutor en un año = 30 (h).

Los costos derivados de la luz son aquellos que provienen tanto del alumbrado como del ordenador y se calculan de la siguiente forma [60] :

- El precio del kilovatio/hora contratando Iberdrola está por 0.135(€/KWh) [61].
- La potencia de uso tanto para el alumbrado como para el ordenador es de 0.24KW y 0.01KW respectivamente, los cuales han sido utilizados durante un periodo aproximado de 3 horas diarias (90 horas mensuales).



$$\text{Coste luz} = \text{Coste KWh} \left(\frac{\text{€}}{\text{KWh}} \right) \cdot \text{Potencia de uso total (KW)} \cdot n^{\circ} \text{ de horas mes} \cdot n^{\circ} \text{ meses} \quad (28)$$

TABLA 6: TABLA DE COSTOS ANUAL.

Categoría del costo	Importe anual	
	Total (€)	%
Costos directos		
Hardware	800	6.4
Software Ansys 2019 R2	900	7.2
Software Matlab R2019A	800	6.4
Autor del proyecto (mano de obra)	8760	70.2
Formación Ansys CFD	200	1.6
Formación Matlab Fundamentals	250	2.0
Tutelaje	450	3.6
Subtotal	12160	
Costos indirectos		
Luz	36.45	0.3
Internet	240	1.9
Desplazamiento	50	0.4
Subtotal	326.45	
Costo total	12486.45	100

CAPÍTULO VII PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO

CHAPTER VII PROJECT PLANIFICATION

Para la correcta realización de este proyecto se ha llevado consigo una planificación de las diversas tareas a realizar y del periodo de tiempo dedicado a estas. Por medio de un diagrama de Gantt se representa de manera más visual las actividades realizadas y el tiempo utilizado en su finalización.

TABLA 7: FASES DEL PROYECTO Y DÍAS NECESARIOS.

Fase del proyecto	Tarea a realizar	Fecha de inicio	Fecha de finalización	Duración de la actividad en días
Estudio del caso	Documentación inicial	01/11/2018	18/12/2018	18
	Estado del arte*	19/11/2018	15/12/2018	27
Proceso de trabajo CFD	Iniciación*	01/02/2019	18/03/2019	46
	Diseño	18/03/2019	14/04/2019	28
	Mallado	15/04/2019	09/06/2019	56
	Simulación*	28/06/2019	20/09/2019	85
Proceso de trabajo Matlab	Iniciación	23/09/2019	16/10/2019	24
	Código	16/10/2019	18/11/2019	33
	Obtención e interpretación de resultados	18/11/2019	09/12/2019	22
Memoria	Documentación adicional	10/12/2019	12/01/2020	34
	Proceso de elaboración de la memoria	14/12/2019	20/01/2020	38
	Etapas de revisión y corrección	22/01/2019	15/02/2019	25
Total días				436

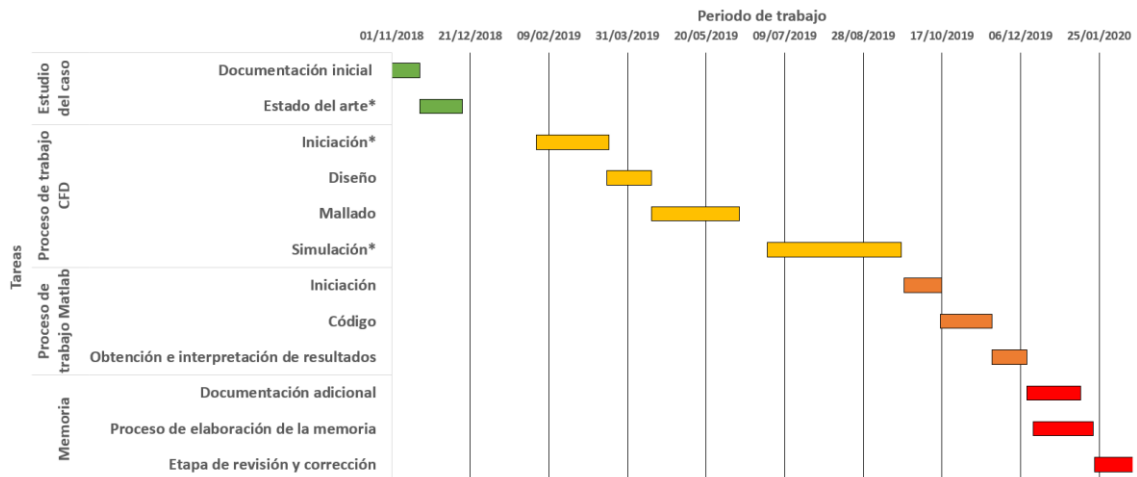


Fig. 78: Diagrama de Gantt.

*

- **Estado del arte:** Búsqueda de información e interpretación de resultados en proyectos referentes al tema elegido.
- **Iniciación CFD:** Aprendizaje del manejo y utilización del software unido a la realización de los primeros modelos de prueba e interpretación de resultados.
- **Simulación CFD:** Proceso de análisis y exportación de los resultados obtenidos para su posterior utilización en Matlab.



CAPÍTULO VIII CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS CHAPTER VIII CONCLUSIONS AND FUTURE PROJECTS

Tras la realización del análisis e interpretación de los modelos estudiados surgen una serie de cuestiones para posibles ramas de trabajo futuras.

7.1. Conclusiones

Primeramente se puede apreciar de una manera más clara que el aumento del valor de la excentricidad genera una ligera disminución en los valores obtenidos de pérdida de carga, independientemente del fluido de trabajo y del modelo de capuchón lo que permite un avance para poder aumentar la zona de HTF en la parte frontal de los tubos $\theta=0^\circ$ mejorando su operatividad.

Seguidamente analizando los tipos de fluidos estudiados se aprecia como las propiedades del sodio son las más favorables siendo muy similares a las que tendría el agua operando a temperatura ambiente, pero como ya se ha indicado previamente el agua no puede ser utilizada debido a las altas temperaturas de trabajo, por ello debiera ser vapor saturado, y previamente se han indicado los problemas de trabajar con vapor saturado (problemas de corrosión y dificultad de almacenamiento). Por ello las alternativas más viables son el sodio y la sal solar que también presenta valores similares, por el contrario el LBE presenta valores muy elevados de pérdida de carga.

Por último tratando el tema que concierne principalmente a este proyecto, se evalúan los resultados obtenidos en función del tipo de capuchón utilizado y de la separación establecida. Aquellos modelos cuya base del capuchón se encuentra más próxima al extremo del tubo bayoneta son los que presentan mayores pérdidas de carga y velocidad, y por ende, mayores pérdidas secundarias, por ello, separaciones mayores obtienen mejores resultados. En el caso de la pérdida de carga esto sucede hasta cierta distancia, ya que se ha comprobado que tras alcanzar un valor mínimo esta vuelve aumentar hasta mantenerse constante en un valor.

Referido al tema del capuchón, los modelos semicircular, plano y con bifurcación más separación son los que presentan los valores más parejos y reducidos, siendo este último el que mejores resultados a obtenido. El modelo de capuchón con bifurcación se encuentra notablemente por encima del resto en todos los datos analizados con los resultados más desfavorables. Téngase en cuenta que se ha realizado un análisis en 2D por ello, el capuchón plano presenta tan buenos resultados.



7.2. Trabajos futuros

El campo de la energía solar se encuentra en pleno desarrollo por lo que las ramas de investigación son amplias. Centrándose en el ámbito de los receptores termosolares de tipo torre, los estudios pueden variar dependiendo de qué parte se quiere investigar, uno de ellos puede ser el tema de los receptores, ya que, aunque dentro de este campo posiblemente sea el elemento que más haya podido estudiarse siempre existen inconvenientes provenientes de su uso y la posibilidad de incrementar su rendimiento hasta la operatividad máxima o ideal.

Otra posibilidad a investigar, más en relación con este proyecto es la torre central, en particular los receptores externos utilizados para recibir y transportar la radiación solar en forma de calor. Estos estudios pueden ir desde la optimización de los receptores ya existentes o el desarrollo de nuevos modelos como el modelo tubo bayoneta, utilizado para este proyecto que aún está en desarrollo.

Tratando de esclarecer y continuar el desarrollo de este proyecto, una alternativa viable de estudio es el análisis de modelos tridimensionales basados en el capuchón con bifurcación y separación que mejores resultados ha generado, de este modo se puede comprobar cómo se comporta en un modelo más cercano a la realidad. Para mejorar este estudio pueden añadirse en estos modelos factores como la temperatura o el efecto de la gravedad, despreciados en este proyecto, inclusive la búsqueda de nuevos materiales para el receptor tubo bayoneta.



CAPÍTULO IX BIBLIOGRAFÍA

CHAPTER IX BIBLIOGRAPHY

- [1] «<https://blogverde.wordpress.com/blog/>,» 15 12 2016. [En línea]. Available: <https://blogverde.wordpress.com/2016/12/15/cuales-son-las-principales-fuentes-de-energias-del-mundo/>. [Último acceso: 12 2019].
- [2] «<https://twenergy.com/>,» [En línea]. Available: <https://twenergy.com/ecologia-y-reciclaje/medio-ambiente/la-electricidad-frente-al-combustible-2734/>. [Último acceso: 12 2019].
- [3] «<https://www.woodmac.com/>,» [En línea]. Available: <https://www.woodmac.com/>. [Último acceso: 12 2019].
- [4] B. N. Mundo, «<https://www.bbc.com/>,» 3 12 2018. [En línea]. Available: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-46426822>. [Último acceso: 12 2019].
- [5] K. Levin-October, «<https://www.wri.org/>,» 07 10 2018. [En línea]. Available: <https://www.wri.org/blog/2018/10/half-degree-and-world-apart-difference-climate-impacts-between-15-c-and-2-c-warming>. [Último acceso: 12 2019].
- [6] «<https://www.aura-energia.com/>,» [En línea]. Available: <https://www.aura-energia.com/ventajas-e-inconvenientes-de-las-energias-renovables/>. [Último acceso: 12 2019].
- [7] «<https://www.implika.es/>,» 28 01 2019. [En línea]. Available: <https://www.implika.es/blog/estudiar-energias-renovables-cuales-son-las-salidas-laborales>. [Último acceso: 12 2019].
- [8] «<https://www.factorenergia.com/es/>,» 30 08 2018. [En línea]. Available: <https://www.factorenergia.com/es/blog/noticias/energias-renovables-caracteristicas-tipos-nuevos-retos/>. [Último acceso: 12 2019].
- [9] «<https://www.antala.es/>,» 09 03 2019. [En línea]. Available: <https://www.antala.es/ventajas-y-desventajas-energia-eolica/>. [Último acceso: 12 2019].
- [10] C. Casal, «<https://www.turismodeobservacion.com/home/>,» 14 12 2019. [En línea]. Available: <https://www.turismodeobservacion.com/foto/parque-eolico-del-puerto-de-bilbao-dique-de-punta-lucero/52891/>. [Último acceso: 12 2019].
- [11] «<https://es.wikipedia.org/>,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_e%C3%B3lica_en_Espa%C3%B1a. [Último acceso: 12 2019].

- [12] F. R. Real, «<https://www.unprofesor.com/>,» 25 01 2018. [En línea]. Available: <https://www.unprofesor.com/ciencias-naturales/que-es-la-energia-hidraulica-y-como-se-aprovecha-2508.html>. [Último acceso: 12 2019].
- [13] B. Sevilla, «<https://es.statista.com/>,» 07 05 2019. [En línea]. Available: <https://es.statista.com/estadisticas/1004247/potencia-hidraulica-instalada-en-espana/>. [Último acceso: 12 2019].
- [14] «<http://www.revistavivienda.com.ar/>,» 05 12 2014. [En línea]. Available: <http://www.revistavivienda.com.ar/destacadas/las-plantas-de-energia-geotermica-mas-grandes-del-mundo>. [Último acceso: 12 2019].
- [15] «<https://www.geotermiavertical.es/>,» [En línea]. Available: <https://www.geotermiavertical.es/energia-geotermica/>. [Último acceso: 12 2019].
- [16] B. Sevilla, «<https://es.statista.com/>,» 12 11 2019. [En línea]. Available: <https://es.statista.com/estadisticas/600568/potencia-geotermica-instalada-por-paises/>. [Último acceso: 12 2019].
- [17] L. Ojea, «<https://elperiodicodelaenergia.com/>,» 15 04 2019. [En línea]. Available: <https://elperiodicodelaenergia.com/un-sistema-energetico-mundial-100-renovable-en-2050-es-posible-y-encima-mas-barato/>. [Último acceso: 12 2019].
- [18] «<https://globalwindatlas.info/>,» [En línea]. Available: <https://globalsolaratlas.info/map?c=46.164614,39.990234,4&r=IRN>. [Último acceso: 12 2019].
- [19] «<https://solar-energia.net/>,» [En línea]. Available: <https://solar-energia.net/>. [Último acceso: 12 2019].
- [20] «<https://www.damiasolar.com/inicio>,» [En línea]. Available: https://www.damiasolar.com/actualidad/blog/articulos-sobre-la-energia-solar-y-sus-componentes/funcionamiento-efecto-fotovoltaico_1. [Último acceso: 12 2019].
- [21] J. Á. Pedraza, «<https://oroinformacion.com/>,» 22 04 2019. [En línea]. Available: <https://oroinformacion.com/el-aumento-de-la-demanda-de-paneles-solares-incrementara-el-precio-de-la-plata/>. [Último acceso: 12 2019].
- [22] F. Olmedo, «<https://www.biodisol.com/>,» [En línea]. Available: <https://www.biodisol.com/destacado/que-es-un-colector-solar-o-captador-solar-tipos-de-colectores-solares-energia-solar-termica/>. [Último acceso: 12 2019].
- [23] C. M. Martín, Estudio de la separación de tubos en el receptor de una central termosolar de tipo torre, 2019.



- [24] «<https://www.energiasolar365.com/>,» 26 01 2011. [En línea]. Available: <https://www.energiasolar365.com/articulos/que-son-los-colectores-solares>. [Último acceso: 12 2019].
- [25] «<https://www.flickr.com/>,» [En línea]. Available: <https://www.flickr.com/photos/jumanjisolar/4377885466>. [Último acceso: 12 2019].
- [26] D. Tocmo, «<https://www.energystoragedirect.com.au/>,» 30 01 2018. [En línea]. Available: <https://www.energystoragedirect.com.au/solar-energy/south-australia-build-worlds-biggest-thermal-solar-plant/>. [Último acceso: 12 2019].
- [27] J. C. Company, Análisis de Colectores Lineales de Concentración con Distintos Tipos de Fluidos.
- [28] M. Celador, Diseño y Análisis de una Central Termosolar de Torre Central Operando con Sodio Fundido.
- [29] «http://www.moldesymatrices.com/pagina_principal-ferias.html,» [En línea]. Available: http://www.moldesymatrices.com/Expoquimia_SCHOTT-Solar.htm. [Último acceso: 01 2020].
- [30] «<http://opex-energy.com/index.html>,» [En línea]. Available: http://opex-energy.com/termosolares/campo_solar_termosolar.html. [Último acceso: 01 2020].
- [31] <https://misionesonline.net/>. [En línea]. Available: <https://misionesonline.net/2012/04/11/la-energia-solar-es-una-alternativa-para-generar-electricidad-en-todo-el-pais/>. [Último acceso: 01 2020].
- [32] «<https://themorningstarg2.wordpress.com/>,» [En línea]. Available: <https://themorningstarg2.wordpress.com/tag/discos-stirling/>. [Último acceso: 01 2020].
- [33] J. Deign, «<http://es.csptoday.com/>,» 14 09 2012. [En línea]. Available: <http://es.csptoday.com/tecnolog%C3%ADa/el-problema-con-la-termosolar-de-disco-stirling>. [Último acceso: 01 2020].
- [34] «<http://www.soltigua.com/>,» [En línea]. Available: <http://www.soltigua.com/flt-introduccion/>. [Último acceso: 01 2020].
- [35] «<https://www.researchgate.net/>,» [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Diagram-of-a-linear-Fresnel-collector_fig6_318360867. [Último acceso: 01 2020].
- [36] «Planta Termosolar Noorolll».
- [37] C. S. Ruiz, Análisis Termoeconómico de una Central Termosolar de Torre con Sales Fundidas.

- [38] A. G. Sánchez, Estudio del comportamiento de metales líquidos en sistemas de torre central.
- [39] M. Á. M. Avilés, Estudio de la influencia del fluido caloportador en las propiedades térmicas e hidrodinámicas de un receptor tubo-bayoneta.
- [40] «<http://bibing.us.es/>,» [En línea]. Available: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4260/fichero/Memoria+PFC%252FCap%C3%ADulo+2.+Sistemas+de+Receptor+Central.pdf>.
- [41] C. G. Quintero, Optimización de la altura de torre en campos de heliostatos circulares”..
- [42] SENER, Energía Solar: Estado Actual y Perspectiva Inmediata, 2005.
- [43] V. H. Castellano, Estudio Térmico e Hidrodinámico de Posibles Secciones en los Tubos de un Receptor Termosolar.
- [44] M. Alice, «<https://www.teknoplof.com/>,» [En línea]. Available: <https://www.teknoplof.com/2014/11/06/ps10-la-megatorre-sevillana-de-la-energia-solar-y-como-funciona/>. [Último acceso: 12 2019].
- [45] «<https://analysis.newenergyupdate.com/>,» 31 07 2019. [En línea]. Available: <https://analysis.newenergyupdate.com/csp-es/la-csp-centrifuga-ofrece-mejoras-de-emplazamiento-y-una-potencia-de-60-mwh>. [Último acceso: 01 2020].
- [46] «<https://torresolenergy.com/en/>,» [En línea]. Available: <https://torresolenergy.com/en/gemasolar/>. [Último acceso: 12 2019].
- [47] A. B. F., «<https://www.energias-renovables.com/>,» 18 12 2018. [En línea]. Available: <https://www.energias-renovables.com/termosolar/almacenes-de-energias-renovables-20181218>. [Último acceso: 01 2020].
- [48] «<https://sites.google.com/site/bohiotecnologia/>,» [En línea]. Available: <https://sites.google.com/site/bohiotecnologia/secador-de-manos/centrales-termosolares>. [Último acceso: 01 2020].
- [49] M. R. Sánchez, Thermal, mechanical and hydrodynamic analysis to optimize the design of molten salt central receivers of solar tower power plants.
- [50] M. R. Sánchez, Comparison of simplified heat transfer models and CFD simulations for molten salt external receiver.
- [51] «<https://www.inta.es/INTA/es/index.html>,» 16 01 2019. [En línea]. Available: <https://www.inta.es/APIWeb/es/presentaciones-y-seminarios/materiales-y-energia-termosolar/>.



- [52] D. J. Erasmus, Capability of a Novel Impingement Heat Transfer Device for Application in Future Solar Thermal Receivers.
- [53] R. P. Álvarez, Comparison of the Heat Transfer Characteristics of Molten Salt, Liquid Sodium and Supercritical CO₂ in Bayonet Tubes of Solar Tower Receivers.
- [54] M. R. Sánchez, On the Design of Solar External Receivers.
- [55] «<https://www.cfd-online.com/>,» [En línea]. Available: https://www.cfd-online.com/Wiki/Linear_eddy_viscosity_models. [Último acceso: 03 2019].
- [56] B. L. a. D. Spalding, The Numerical Computation of Turbulent Flows.
- [57] «<https://www.simscale.com/>,» 01 05 2018. [En línea]. Available: <https://www.simscale.com/forum/t/what-is-y-plus/82394>. [Último acceso: 05 2019].
- [58] «<https://www.cfd-online.com/>,» [En línea]. Available: [https://www.cfd-online.com/Wiki/Dimensionless_wall_distance_\(y_plus\)](https://www.cfd-online.com/Wiki/Dimensionless_wall_distance_(y_plus)). [Último acceso: 05 2019].
- [59] «<https://es.slideshare.net/>,» [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/bocha76/hidraulica-en-tuberias-13662585>. [Último acceso: 12 2019].
- [60] «<https://comparadorluz.com/>,» [En línea]. Available: <https://comparadorluz.com/tarifas/precio-kwh>. [Último acceso: 11 2019].
- [61] «<https://tarifasgasluz.com/comercializadoras/iberdrola/precio-kwh>,» [En línea]. Available: <https://tarifasgasluz.com/comercializadoras/iberdrola/precio-kwh>. [Último acceso: 11 2019].
- [62] D. Iglesias, Estudio Numérico del Flujo de Sales Fundidas en un Receptor Central de Torre Mediante Fluent.

ANEXOS ANNEXES

Anexo I: Valores obtenidos del diseño inicial

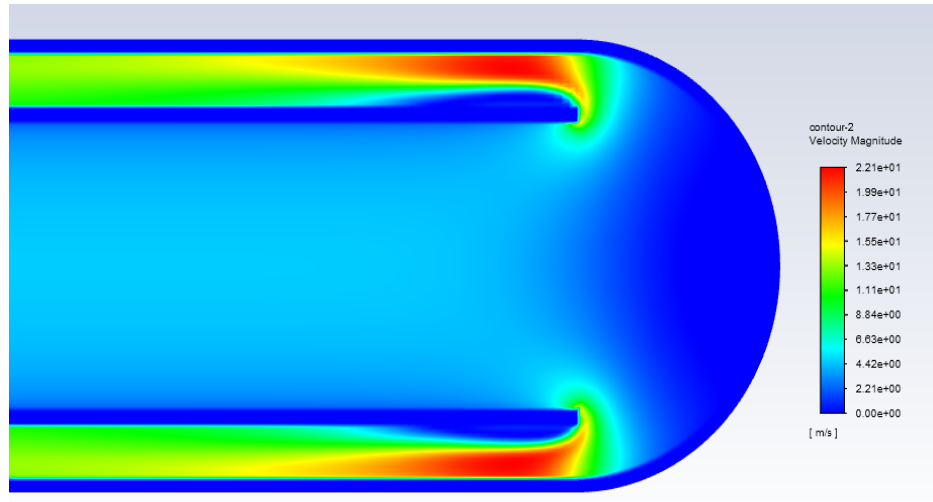


Fig. 79: Contorno de velocidades obtenido para un capuchón semicircular en el diseño inicial.

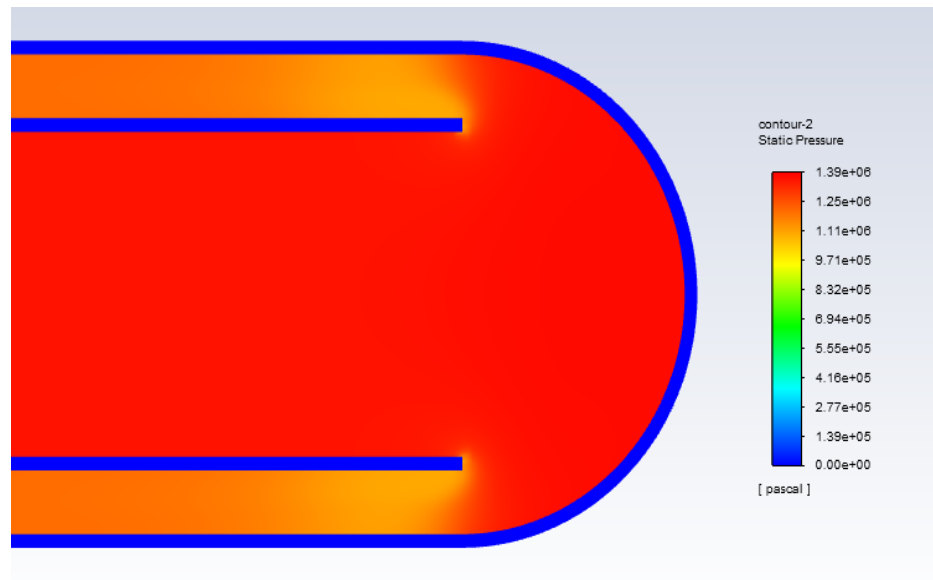


Fig. 80: Contorno de presiones obtenido para un capuchón semicircular en el diseño inicial.

Console	
Parallel variables... Done.	
Area-Weighted Average	(pascal)
-----	-----
presion-promedio-entrada-salida	996778.95
Area-Weighted Average	(m/s)
-----	-----
velocidad-promedio-entrada-salida	7.1854828

Fig. 81: Tabla de valores promedio de la presión y velocidad para un modelo inicial de capuchón semicircular.

Anexo II: Análisis comparativo de los modelos turbulentos

Reynold stress model

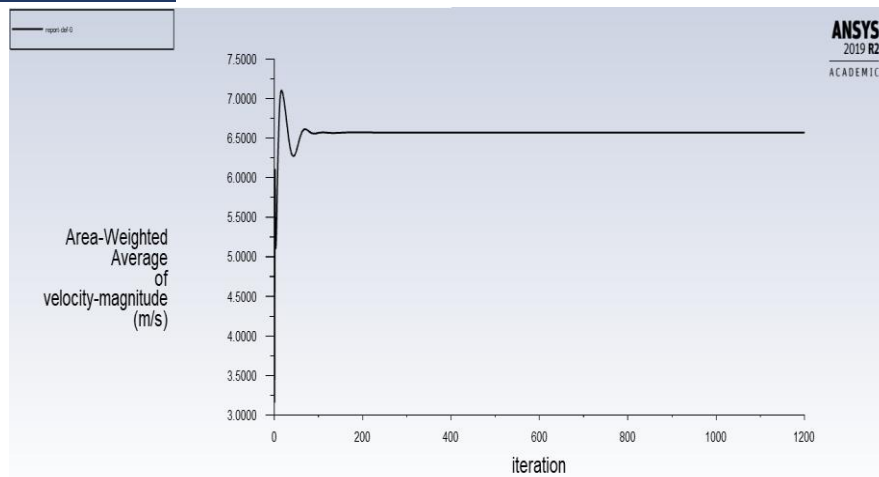


Fig. 82: Gráfico de la estabilización del valor de velocidad a la salida del tubo para el modelo turbulento Reynold Stress Model.

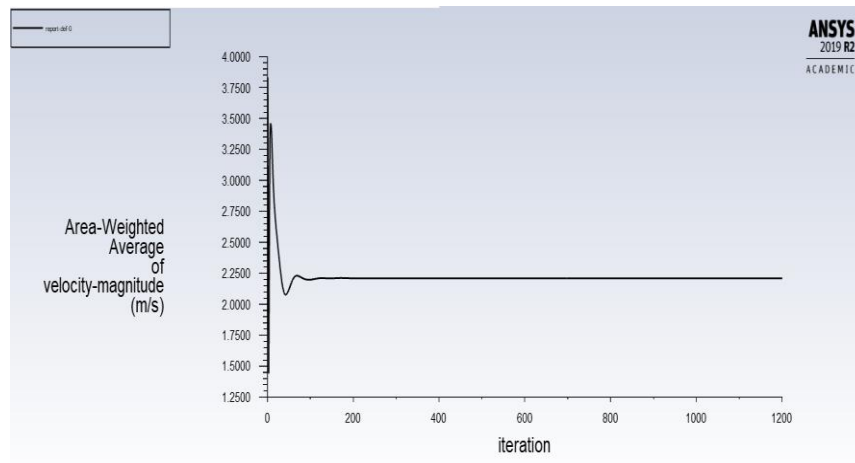


Fig. 83: Gráfico de la estabilización del valor de velocidad a la salida del tubo para un mayor número de elementos en el mallado para el modelo turbulento Reynold Stress Model.

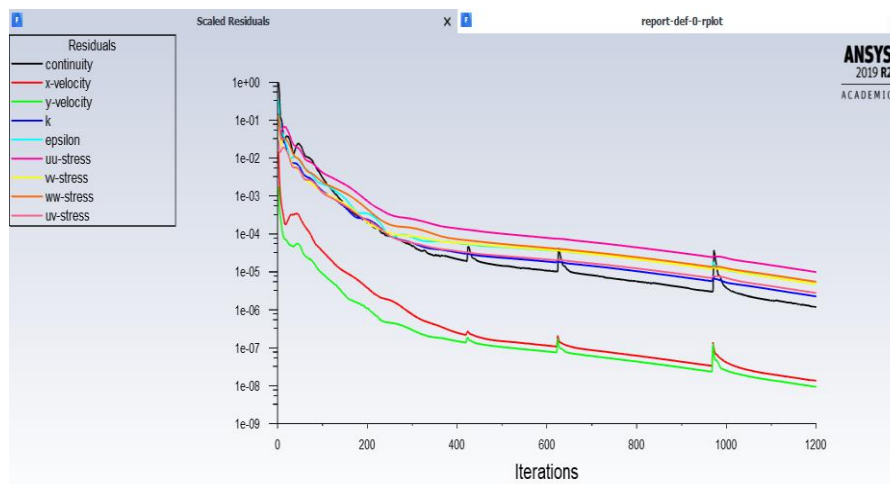


Fig. 84: Valores de los datos utilizados para resolver el modelo turbulento Reynolds Stress Model en función del número de iteraciones.

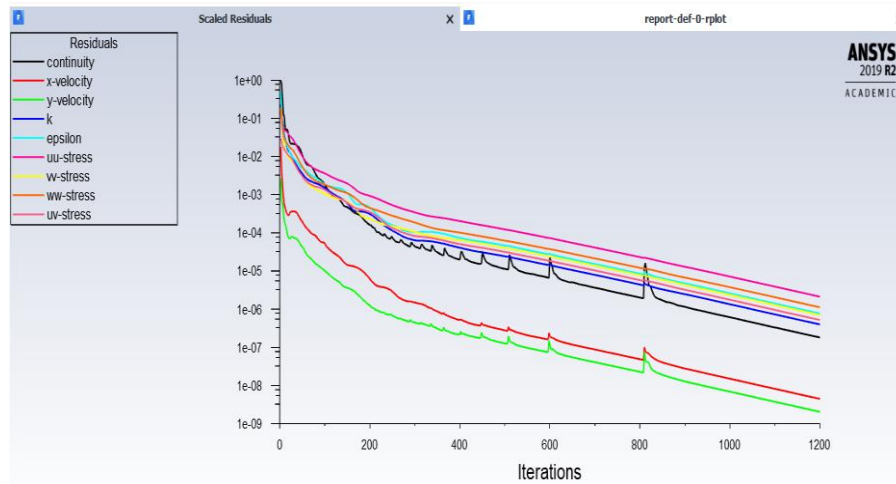


Fig. 85: Valores de los datos utilizados para resolver el modelo turbulento Reynolds Stress Model para un mayor número de elementos en función del número de iteraciones.

k- ω

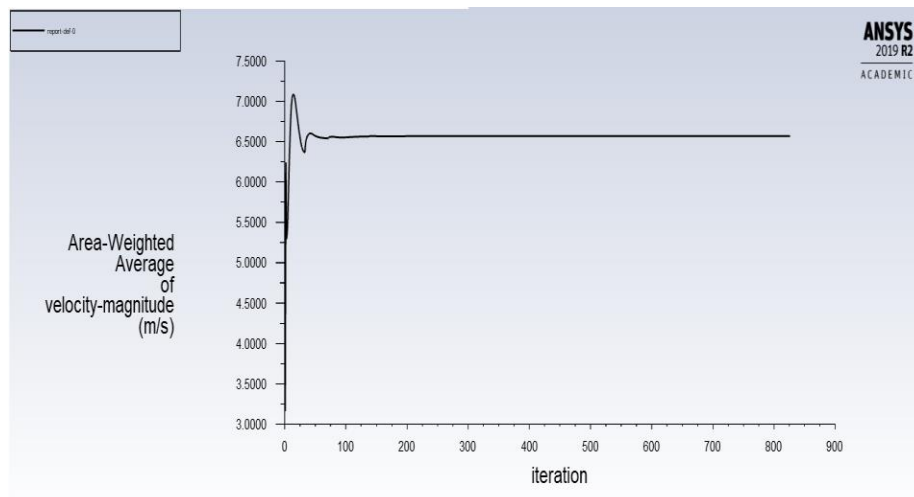


Fig. 86: Gráfico de la estabilización del valor de velocidad a la salida del tubo para el modelo turbulento k- ω .

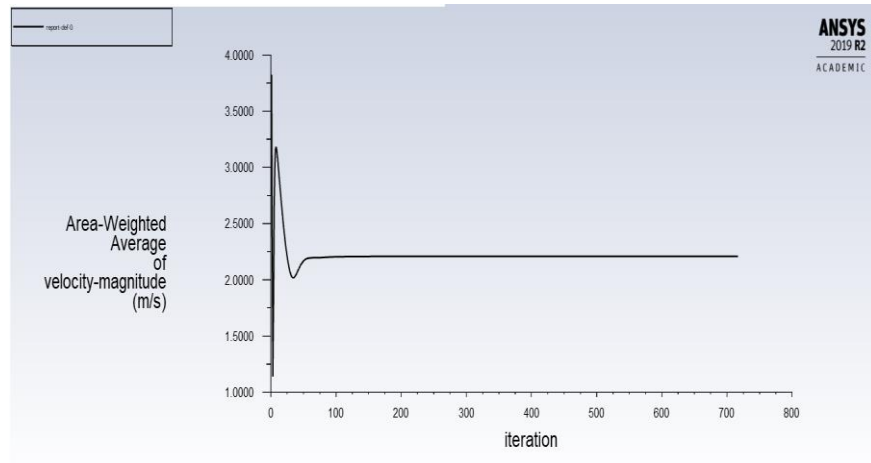


Fig. 87: Gráfico de la estabilización del valor de velocidad a la salida del tubo para un mayor número de elementos en el mallado para el modelo turbulento $k-\omega$.

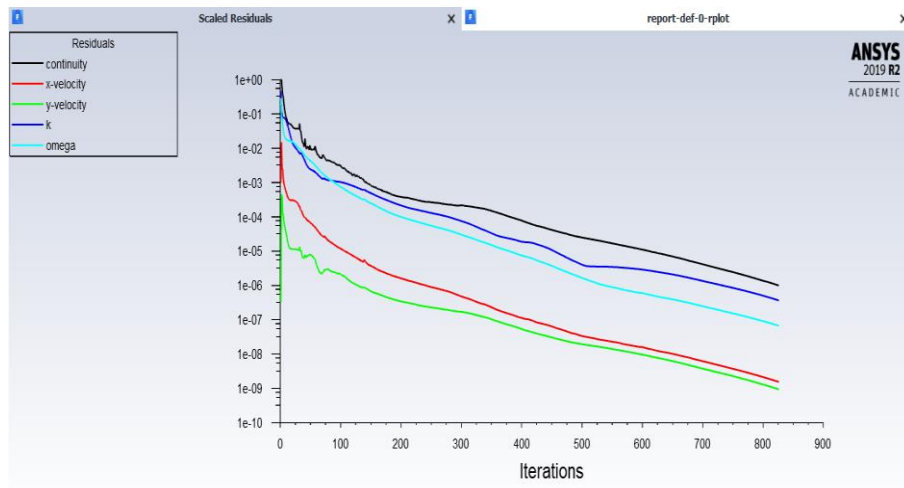


Fig. 88: Valores de los datos utilizados para resolver el modelo turbulento $k-\omega$ en función del número de iteraciones.

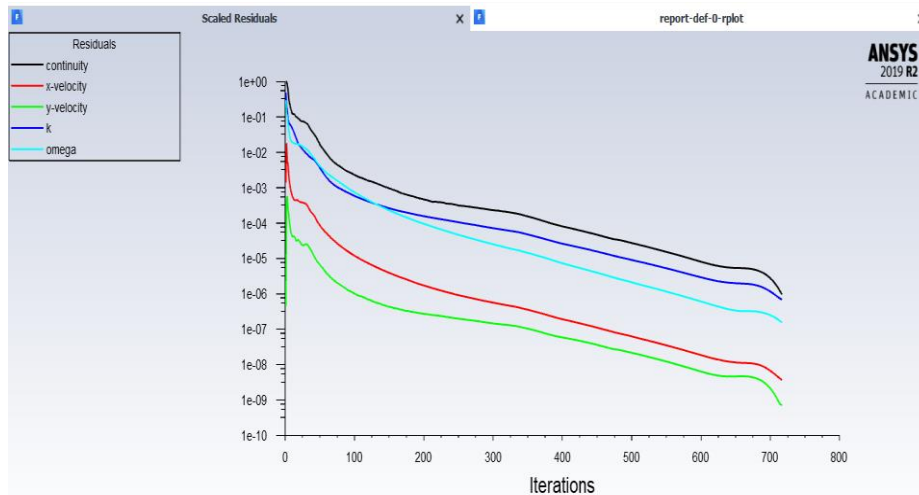


Fig. 89: Valores de los datos utilizados para resolver el modelo turbulento $k-\omega$ para un mayor número de elementos en función del número de iteraciones.

K-epsilon

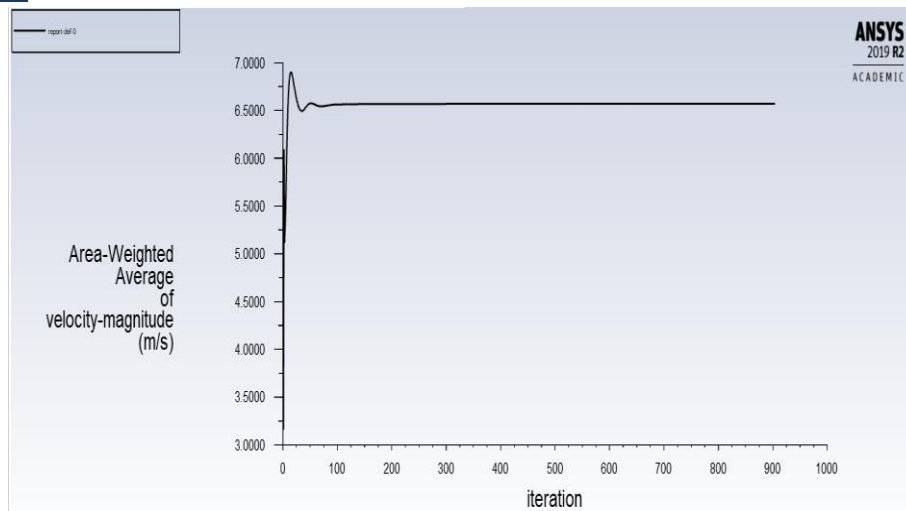


Fig. 90: Gráfico de la estabilización del valor de velocidad a la salida del tubo para el modelo turbulento $k-\epsilon$.

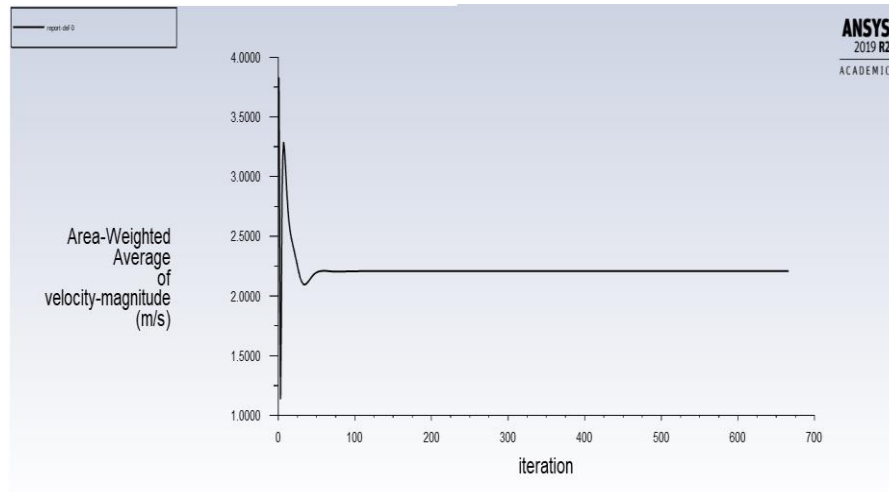


Fig. 91: Gráfico de la estabilización del valor de velocidad a la salida del tubo para un mayor número de elementos en el mallado para el modelo turbulento $k-\epsilon$.

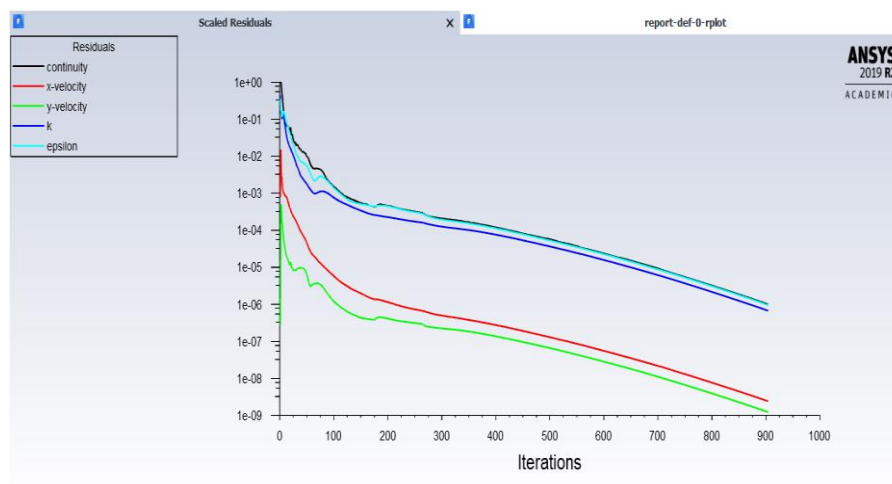


Fig. 92: Valores de los datos utilizados para resolver el modelo turbulento $k-\epsilon$ en función del número de iteraciones.

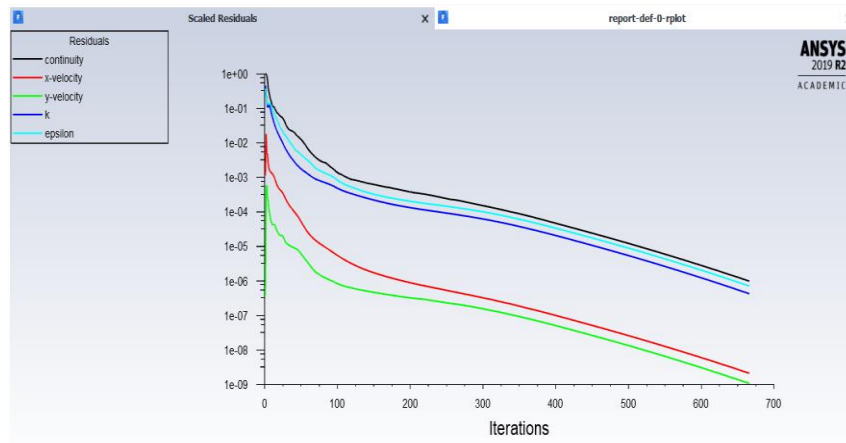


Fig. 93: Valores de los datos utilizados para resolver el modelo turbulento k - ϵ para un mayor número de elementos en función del número de iteraciones.

Anexo III: Diagrama de Moody

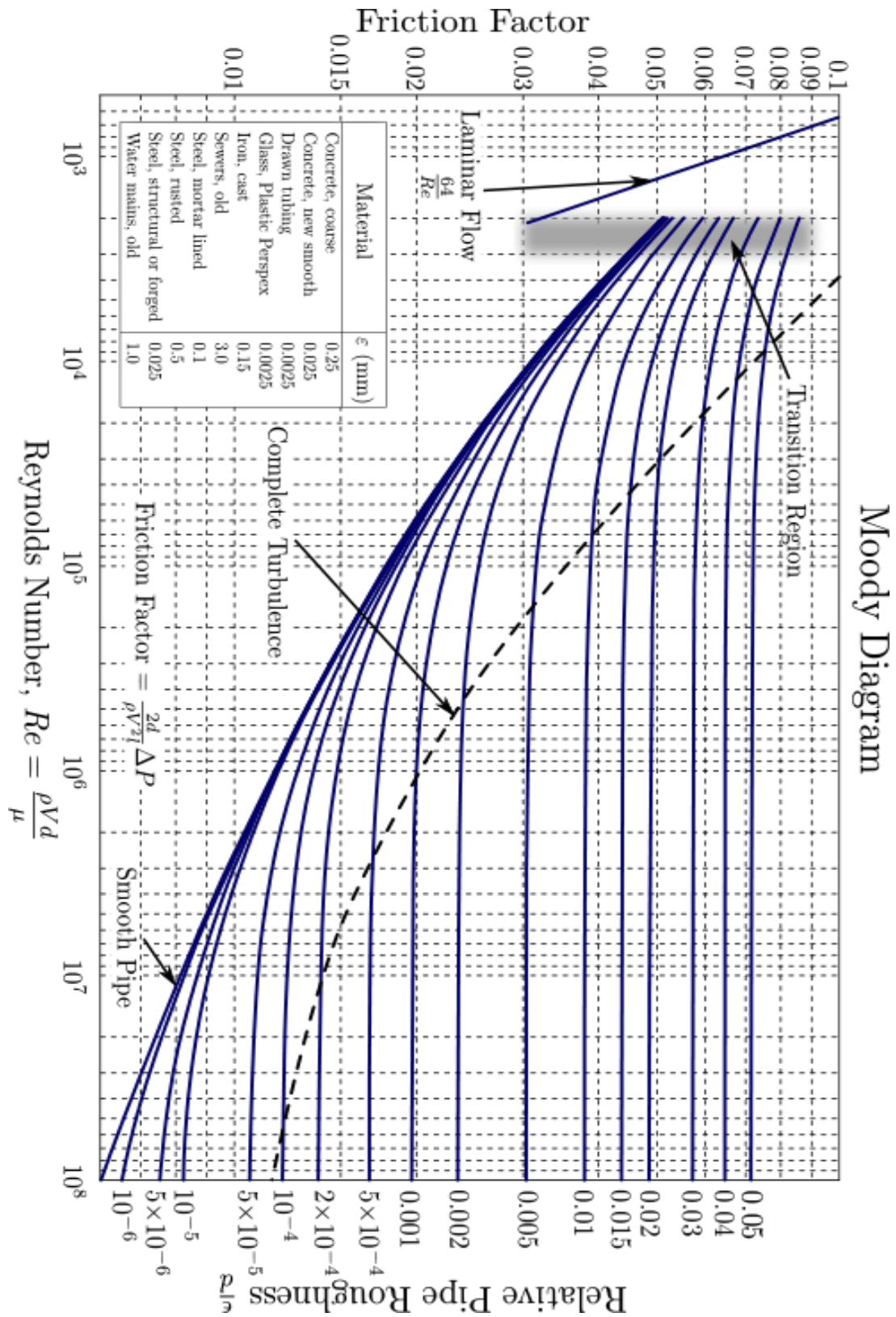


Fig. 94: Diagrama de Moody



Anexo IV: Código Matlab

```
function [ AP10,AP9_5,AP8,vmax10,vmax9_5,vmax8,k10,k9_5,k8
]=funcion_resultados(modelo1)
format long
Datos=importdata(modelo1);

%% VECTORES DE DATOS INICIALES
% VECTORES DE DATOS INICIALES PARA 3 POSICIONES DISTINTAS

%Definimos todas las variables que van a utilizarse
%Diámetros de los tubos
Di=0.042;
di=0.0226;
de=0.025;
De=0.0446;
%El valor de la excentricidad variará según el caso
e=0;

%Coordenadas en x donde se harán los estudios
Ax_0=10;
Ax_1=9.5;
Ax_2=0;

Tabla_Datos=Datos.data;

%Establecemos para cada columna de datos un vector
xcoord=Tabla_Datos(:,2);
ycoord=Tabla_Datos(:,3);
staticpressure=Tabla_Datos(:,4);
dinamicpressure=Tabla_Datos(:,6);
absolutepressure=Tabla_Datos(:,7);
totalpressure=Tabla_Datos(:,8);
density=Tabla_Datos(:,10);
densityall=Tabla_Datos(:,11);
velocitymagnitude=Tabla_Datos(:,12);
velocityx=Tabla_Datos(:,13);
velocityy=Tabla_Datos(:,14);
cellvolume=Tabla_Datos(:,15);

%Buscamos aquellos valores que se encuentren a una distancia lo más cercana
%posible de x=0,9.5 y 10 metros
%Primero sacamos del vector xcoord aquellos valores que no se
%repiten
x_unico=unique(xcoord);
%Cogemos únicamente los valores positivos de la diferencia entre
```

```

    %x_unico y Ax_
vector_operado=abs(x_unico-Ax_0);

    %AS_ será el valor cuya diferencia sea la más pequeña
AS_0=x_unico(find(min(vector_operado)==vector_operado));

x_unico=unique(xcoord);
vector_operado=abs(x_unico-Ax_1);
AS_1=x_unico(find(min(vector_operado)==vector_operado));
x_unico=unique(xcoord);
vector_operado=abs(x_unico-Ax_2);
AS_2=x_unico(find(min(vector_operado)==vector_operado));

    %El vector filas serán las posiciones de la matriz que se encuentren
    %en las posiciones xcoord delimitadas anteriormente
filas10=find(xcoord==AS_0);
filas9_5=find(xcoord==AS_1);
filas0=find(xcoord==AS_2);

    % Vectores de datos para las posiciones buscadas
xcoord10=xcoord(filas10);
ycoord10=ycoord(filas10);
staticpressure10=staticpressure(filas10);
dynamicpressure10=dynamicpressure(filas10);
absolutepressure10=absolutepressure(filas10);
totalpressure10=totalpressure(filas10);
density10=density(filas10);
densityall10=densityall(filas10);
velocitymagnitude10=velocitymagnitude(filas10);
velocityx10=velocityx(filas10);
velocityy10=velocityy(filas10);
cellvolume10=cellvolume(filas10);

xcoord9_5=xcoord(filas9_5);
ycoord9_5=ycoord(filas9_5);
staticpressure9_5=staticpressure(filas9_5);
dynamicpressure9_5=dynamicpressure(filas9_5);
absolutepressure9_5=absolutepressure(filas9_5);
totalpressure9_5=totalpressure(filas9_5);
density9_5=density(filas9_5);
densityall9_5=densityall(filas9_5);
velocitymagnitude9_5=velocitymagnitude(filas9_5);
velocityx9_5=velocityx(filas9_5);
velocityy9_5=velocityy(filas9_5);
cellvolume9_5=cellvolume(filas9_5);

xcoord0=xcoord(filas0);

```




```

ycoord0=ycoord(filas0);
staticpressure0=staticpressure(filas0);
dinamicpressure0=dinamicpressure(filas0);
absolutepressure0=absolutepressure(filas0);
totalpressure0=totalpressure(filas0);
density0=density(filas0);
densityall0=densityall(filas0);
velocitymagnitude0=velocitymagnitude(filas0);
velocityx0=velocityx(filas0);
velocityy0=velocityy(filas0);
cellvolume0=cellvolume(filas0);

```

%% VECTORES DE DATOS FINALES % VECTORES DE DATOS EN FUNCIÓN DE LA EXCENTRICIDAD Y POSICIÓN

```

%Dividimos nuestros vectores de datos en una zona interior y otra
%zona exterior que irán en función de la excentricidad que exista entre los
%tubos

```

```

    %El texto que se muestra a continuación se encuentra desactivado
    %pero sirve para que el código te pregunte por el valor de
    %excentricidad del tubo que se está estudiando

```

```

%prompt='¿Cuál es el valor de la excentricidad?';
%e=input(prompt);
%while ((e~=0) && (e~=4.3) && (e~=6.88))
%    disp('Error, seleccione otra opción')
%e=input(prompt);
%end

```

```

if e==0

```

```

    filas_interior10=find((ycoord10<(di/2)) & (ycoord10>(-di/2)));
    filas_exterior10sup=find((ycoord10>(de/2)) & (ycoord10<(Di/2)));
    filas_exterior10inf=find((ycoord10<(-de/2)) & (ycoord10>(-Di/2)));

```

```

    filas_interior9_5=find((ycoord9_5<(di/2)) & (ycoord9_5>(-di/2)));
    filas_exterior9_5sup=find((ycoord9_5>(de/2)) & (ycoord9_5<(Di/2)));
    filas_exterior9_5inf=find((ycoord9_5<(-de/2)) & (ycoord9_5>(-Di/2)));

```

```

    filas_interior8=find((ycoord8<(di/2)) & (ycoord8>(-di/2)));
    filas_exterior8sup=find((ycoord8>(de/2)) & (ycoord8<(Di/2)));
    filas_exterior8inf=find((ycoord8<(-de/2)) & (ycoord8>(-Di/2)));

```

```

elseif e==4.3

```

```

    filas_interior10=find((ycoord10<((di/2)+0.0043)) & (ycoord10>((-di/2)+0.0043)));
    filas_exterior10sup=find((ycoord10>((de/2)+0.0043)) & (ycoord10<(Di/2)));
    filas_exterior10inf=find((ycoord10<((-de/2)+0.0043)) & (ycoord10>(-Di/2)));

```

```

filas_interior9_5=find((ycoord9_5<((di/2)+0.0043)) & (ycoord9_5>((-di/2)+0.0043)));
filas_exterior9_5sup=find((ycoord9_5>((de/2)+0.0043)) & (ycoord9_5<(Di/2)));
filas_exterior9_5inf=find((ycoord9_5<((-de/2)+0.0043)) & (ycoord9_5>(-Di/2)));

```

```

filas_interior0=find((ycoord0<((di/2)+0.0043)) & (ycoord0>((-di/2)+0.0043)));
filas_exterior0sup=find((ycoord0>((de/2)+0.0043)) & (ycoord0<(Di/2)));
filas_exterior0inf=find((ycoord0<((-de/2)+0.0043)) & (ycoord0>(-Di/2)));

```

elseif e==6.88

```

filas_interior10=find((ycoord10<((di/2)+0.0068)) & (ycoord10>((-di/2)+0.0068)));
filas_exterior10sup=find((ycoord10>((de/2)+0.0068)) & (ycoord10<(Di/2)));
filas_exterior10inf=find((ycoord10<((-de/2)+0.0068)) & (ycoord10>(-Di/2)));

```

```

filas_interior9_5=find((ycoord9_5<((di/2)+0.0068)) & (ycoord9_5>((-di/2)+0.0068)));
filas_exterior9_5sup=find((ycoord9_5>((de/2)+0.0068)) & (ycoord9_5<(Di/2)));
filas_exterior9_5inf=find((ycoord9_5<((-de/2)+0.0068)) & (ycoord9_5>(-Di/2)));

```

```

filas_interior0=find((ycoord0<((di/2)+0.0068)) & (ycoord0>((-di/2)+0.0068)));
filas_exterior0sup=find((ycoord0>((de/2)+0.0068)) & (ycoord0<(Di/2)));
filas_exterior0inf=find((ycoord0<((-de/2)+0.0068)) & (ycoord0>(-Di/2)));

```

end

% Vectores de datos para el tubo interior para 10 metros

```

xcoord_interior10=xcoord10(filas_interior10);
ycoord_interior10=ycoord10(filas_interior10);
staticpressure_interior10=staticpressure10(filas_interior10);
dinamicpressure_interior10=dinamicpressure10(filas_interior10);
absolutepressure_interior10=absolutepressure10(filas_interior10);
totalpressure_interior10=totalpressure10(filas_interior10);
density_interior10=density10(filas_interior10);
densityall_interior10=densityall10(filas_interior10);
velocitymagnitude_interior10=velocitymagnitude10(filas_interior10);
velocityx_interior10=velocityx10(filas_interior10);
velocityy_interior10=velocityy10(filas_interior10);
cellvolume_interior10=cellvolume10(filas_interior10);

```

% Vectores de datos para el tubo interior para 9.5 metros

```

xcoord_interior9_5=xcoord9_5(filas_interior9_5);
ycoord_interior9_5=ycoord9_5(filas_interior9_5);
staticpressure_interior9_5=staticpressure9_5(filas_interior9_5);
dinamicpressure_interior9_5=dinamicpressure9_5(filas_interior9_5);
absolutepressure_interior9_5=absolutepressure9_5(filas_interior9_5);
totalpressure_interior9_5=totalpressure9_5(filas_interior9_5);
density_interior9_5=density9_5(filas_interior9_5);
densityall_interior9_5=densityall9_5(filas_interior9_5);
velocitymagnitude_interior9_5=velocitymagnitude9_5(filas_interior9_5);
velocityx_interior9_5=velocityx9_5(filas_interior9_5);
velocityy_interior9_5=velocityy9_5(filas_interior9_5);
cellvolume_interior9_5=cellvolume9_5(filas_interior9_5);

```



% Vectores de datos para el tubo interior para 0 metros

```
xcoord_interior0=xcoord0(filas_interior0);
ycoord_interior0=ycoord0(filas_interior0);
staticpressure_interior0=staticpressure0(filas_interior0);
dinamicpressure_interior0=dinamicpressure0(filas_interior0);
absolutepressure_interior0=absolutepressure0(filas_interior0);
totalpressure_interior0=totalpressure0(filas_interior0);
density_interior0=density0(filas_interior0);
densityall_interior0=densityall0(filas_interior0);
velocitymagnitude_interior0=velocitymagnitude0(filas_interior0);
velocityx_interior0=velocityx0(filas_interior0);
velocityy_interior0=velocityy0(filas_interior0);
cellvolume_interior0=cellvolume0(filas_interior0);
```

%Para facilitar la obtención de datos zona del tubo exterior se ha dividido
 %en la región positiva del eje Y la región negativa de dicho eje y
 %posteriormente se agruparán los datos en un mismo vector

% Vectores de datos para el tubo exterior superior para 10 metros

```
xcoord_exterior10sup=xcoord10(filas_exterior10sup);
ycoord_exterior10sup=ycoord10(filas_exterior10sup);
staticpressure_exterior10sup=staticpressure10(filas_exterior10sup);
dinamicpressure_exterior10sup=dinamicpressure10(filas_exterior10sup);
absolutepressure_exterior10sup=absolutepressure10(filas_exterior10sup);
totalpressure_exterior10sup=totalpressure10(filas_exterior10sup);
density_exterior10sup=density10(filas_exterior10sup);
densityall_exterior10sup=densityall10(filas_exterior10sup);
velocitymagnitude_exterior10sup=velocitymagnitude10(filas_exterior10sup);
velocityx_exterior10sup=velocityx10(filas_exterior10sup);
velocityy_exterior10sup=velocityy10(filas_exterior10sup);
cellvolume_exterior10sup=cellvolume10(filas_exterior10sup);
```

% Vectores de datos para el tubo exterior superior para 9.5 metros

```
xcoord_exterior9_5sup=xcoord9_5(filas_exterior9_5sup);
ycoord_exterior9_5sup=ycoord9_5(filas_exterior9_5sup);
staticpressure_exterior9_5sup=staticpressure9_5(filas_exterior9_5sup);
dinamicpressure_exterior9_5sup=dinamicpressure9_5(filas_exterior9_5sup);
absolutepressure_exterior9_5sup=absolutepressure9_5(filas_exterior9_5sup);
totalpressure_exterior9_5sup=totalpressure9_5(filas_exterior9_5sup);
density_exterior9_5sup=density9_5(filas_exterior9_5sup);
densityall_exterior9_5sup=densityall9_5(filas_exterior9_5sup);
velocitymagnitude_exterior9_5sup=velocitymagnitude9_5(filas_exterior9_5sup);
velocityx_exterior9_5sup=velocityx9_5(filas_exterior9_5sup);
velocityy_exterior9_5sup=velocityy9_5(filas_exterior9_5sup);
cellvolume_exterior9_5sup=cellvolume9_5(filas_exterior9_5sup);
```

% Vectores de datos para el tubo exterior superior para 8 metros

```
xcoord_exterior0sup=xcoord0(filas_exterior0sup);
ycoord_exterior0sup=ycoord0(filas_exterior0sup);
```

```
staticpressure_exterior0sup=staticpressure0(filas_exterior0sup);
dinamicpressure_exterior0sup=dinamicpressure0(filas_exterior0sup);
absolutepressure_exterior0sup=absolutepressure0(filas_exterior0sup);
totalpressure_exterior0sup=totalpressure0(filas_exterior0sup);
density_exterior0sup=density0(filas_exterior0sup);
densityall_exterior0sup=densityall0(filas_exterior0sup);
velocitymagnitude_exterior0sup=velocitymagnitude8(filas_exterior0sup);
velocityx_exterior0sup=velocityx0(filas_exterior0sup);
velocityy_exterior0sup=velocityy0(filas_exterior0sup);
cellvolume_exterior0sup=cellvolume0(filas_exterior0sup);
```

% Vectores de datos para el tubo exterior inferior para 10 metros

```
xcoord_exterior10inf=xcoord10(filas_exterior10inf);
ycoord_exterior10inf=ycoord10(filas_exterior10inf);
staticpressure_exterior10inf=staticpressure10(filas_exterior10inf);
dinamicpressure_exterior10inf=dinamicpressure10(filas_exterior10inf);
absolutepressure_exterior10inf=absolutepressure10(filas_exterior10inf);
totalpressure_exterior10inf=totalpressure10(filas_exterior10inf);
density_exterior10inf=density10(filas_exterior10inf);
densityall_exterior10inf=densityall10(filas_exterior10inf);
velocitymagnitude_exterior10inf=velocitymagnitude10(filas_exterior10inf);
velocityx_exterior10inf=velocityx10(filas_exterior10inf);
velocityy_exterior10inf=velocityy10(filas_exterior10inf);
cellvolume_exterior10inf=cellvolume10(filas_exterior10inf);
```

% Vectores de datos para el tubo exterior inferior para 9.5 metros

```
xcoord_exterior9_5inf=xcoord9_5(filas_exterior9_5inf);
ycoord_exterior9_5inf=ycoord9_5(filas_exterior9_5inf);
staticpressure_exterior9_5inf=staticpressure9_5(filas_exterior9_5inf);
dinamicpressure_exterior9_5inf=dinamicpressure9_5(filas_exterior9_5inf);
absolutepressure_exterior9_5inf=absolutepressure9_5(filas_exterior9_5inf);
totalpressure_exterior9_5inf=totalpressure9_5(filas_exterior9_5inf);
density_exterior9_5inf=density9_5(filas_exterior9_5inf);
densityall_exterior9_5inf=densityall9_5(filas_exterior9_5inf);
velocitymagnitude_exterior9_5inf=velocitymagnitude9_5(filas_exterior9_5inf);
velocityx_exterior9_5inf=velocityx9_5(filas_exterior9_5inf);
velocityy_exterior9_5inf=velocityy9_5(filas_exterior9_5inf);
cellvolume_exterior9_5inf=cellvolume9_5(filas_exterior9_5inf);
```

% Vectores de datos para el tubo exterior inferior para 8 metros

```
xcoord_exterior0inf=xcoord0(filas_exterior0inf);
ycoord_exterior0inf=ycoord0(filas_exterior0inf);
staticpressure_exterior0inf=staticpressure0(filas_exterior0inf);
dinamicpressure_exterior0inf=dinamicpressure0(filas_exterior0inf);
absolutepressure_exterior0inf=absolutepressure0(filas_exterior0inf);
totalpressure_exterior0inf=totalpressure0(filas_exterior0inf);
density_exterior0inf=density0(filas_exterior0inf);
densityall_exterior0inf=densityall0(filas_exterior0inf);
velocitymagnitude_exterior0inf=velocitymagnitude0(filas_exterior0inf);
```



```
velocityx_exterior0inf=velocityx0(filas_exterior0inf);
velocityy_exterior0inf=velocityy0(filas_exterior0inf);
cellvolume_exterior0inf=cellvolume0(filas_exterior0inf);
```

%Juntamos los vectores del tubo exterior para la zona superior e inferior

```
xcoord_exterior10=[xcoord_exterior10sup;xcoord_exterior10inf];
ycoord_exterior10=[ycoord_exterior10sup;ycoord_exterior10inf];
staticpressure_exterior10=[staticpressure_exterior10sup;staticpressure_exterior10inf];
dinamicpressure_exterior10=[dinamicpressure_exterior10sup;dinamicpressure_exterior
10inf];
absolutepressure_exterior10=[absolutepressure_exterior10sup;absolutepressure_exterior
10inf];
totalpressure_exterior10=[totalpressure_exterior10sup;totalpressure_exterior10inf];
density_exterior10=[density_exterior10sup;density_exterior10inf];
densityall_exterior10=[densityall_exterior10sup;densityall_exterior10inf];
velocitymagnitude_exterior10=[velocitymagnitude_exterior10sup;velocitymagnitude_e
xterior10inf];
velocityx_exterior10=[velocityx_exterior10sup;velocityx_exterior10inf];
velocityy_exterior10=[velocityy_exterior10sup;velocityy_exterior10inf];
cellvolume_exterior10=[cellvolume_exterior10sup;cellvolume_exterior10inf];
```

```
xcoord_exterior9_5=[xcoord_exterior9_5sup;xcoord_exterior9_5inf];
ycoord_exterior9_5=[ycoord_exterior9_5sup;ycoord_exterior9_5inf];
staticpressure_exterior9_5=[staticpressure_exterior9_5sup;staticpressure_exterior9_5inf
];
dinamicpressure_exterior9_5=[dinamicpressure_exterior9_5sup;dinamicpressure_exteri
or9_5inf];
absolutepressure_exterior9_5=[absolutepressure_exterior9_5sup;absolutepressure_exter
ior9_5inf];
totalpressure_exterior9_5=[totalpressure_exterior9_5sup;totalpressure_exterior9_5inf];
density_exterior9_5=[density_exterior9_5sup;density_exterior9_5inf];
densityall_exterior9_5=[densityall_exterior9_5sup;densityall_exterior9_5inf];
velocitymagnitude_exterior9_5=[velocitymagnitude_exterior9_5sup;velocitymagnitude
_exterior9_5inf];
velocityx_exterior9_5=[velocityx_exterior9_5sup;velocityx_exterior9_5inf];
velocityy_exterior9_5=[velocityy_exterior9_5sup;velocityy_exterior9_5inf];
cellvolume_exterior9_5=[cellvolume_exterior9_5sup;cellvolume_exterior9_5inf];
```

```
xcoord_exterior0=[xcoord_exterior0sup;xcoord_exterior0inf];
ycoord_exterior0=[ycoord_exterior0sup;ycoord_exterior0inf];
staticpressure_exterior0=[staticpressure_exterior0sup;staticpressure_exterior0inf];
dinamicpressure_exterior0=[dinamicpressure_exterior0sup;dinamicpressure_exterior0i
nf];
absolutepressure_exterior0=[absolutepressure_exterior0sup;absolutepressure_exterior0i
nf];
totalpressure_exterior0=[totalpressure_exterior0sup;totalpressure_exterior0inf];
density_exterior0=[density_exterior0sup;density_exterior0inf];
densityall_exterior0=[densityall_exterior0sup;densityall_exterior0inf];
```

```
velocitymagnitude_exterior0=[velocitymagnitude_exterior0sup;velocitymagnitude_exterior0inf];
velocityx_exterior0=[velocityx_exterior0sup;velocityx_exterior0inf];
velocityy_exterior0=[velocityy_exterior0sup;velocityy_exterior0inf];
cellvolume_exterior0=[cellvolume_exterior0sup;cellvolume_exterior0inf];
```

%% PÉRDIDA DE CARGA % OBTENCIÓN DEL VALOR DE PÉRDIDA DE CARGA EN EL TUBO

%Sacamos el valor de presión para el tubo interior

```
num=0;
denom=0;
for n=1:length(xcoord_interior10)
num=num+cellvolume_interior10(n)*staticpressure_interior10(n);
denom=denom+cellvolume_interior10(n);
end
AP_in10=num/denom;
```

```
num=0;
denom=0;
for n=1:length(xcoord_interior9_5)
num=num+cellvolume_interior9_5(n)*staticpressure_interior9_5(n);
denom=denom+cellvolume_interior9_5(n);
end
AP_in9_5=num/denom;
```

```
num=0;
denom=0;
for n=1:length(xcoord_interior0)
num=num+cellvolume_interior0(n)*staticpressure_interior0(n);
denom=denom+cellvolume_interior0(n);
end
AP_in0=num/denom;
```

%Sacamos el valor de presión para el tubo exterior

```
num=0;
denom=0;
```



```

for n=1:length(xcoord_exterior10)
num=num+cellvolume_exterior10(n)*staticpressure_exterior10(n);
denom=denom+cellvolume_exterior10(n);
end
AP_out10=num/denom;

num=0;
denom=0;
for n=1:length(xcoord_exterior9_5)
num=num+cellvolume_exterior9_5(n)*staticpressure_exterior9_5(n);
denom=denom+cellvolume_exterior9_5(n);
end
AP_out9_5=num/denom;

num=0;
denom=0;
for n=1:length(xcoord_exterior0)
num=num+cellvolume_exterior0(n)*staticpressure_exterior0(n);
denom=denom+cellvolume_exterior0(n);
end
AP_out0=num/denom;

```

%Obtenemos el valor de la variación de presión

```

AP10=AP_in10-AP_out10;
AP9_5=AP_in9_5-AP_out9_5;
AP0=AP_in0-AP_out0;

```

%% VARIACIÓN DE VELOCIDAD

% OBTENCIÓN DE LA VARIACIÓN DE VELOCIDAD ENTRE LA ZONA
INTERIOR Y EXTERIOR

%Sacamos el valor de velocidad para el tubo interior

```

num=0;
denom=0;
for n=1:length(xcoord_interior10)
num=num+cellvolume_interior10(n)*velocitymagnitude_interior10(n);
denom=denom+cellvolume_interior10(n);
end
Av_in10=num/denom;

num=0;
denom=0;
for n=1:length(xcoord_interior9_5)
num=num+cellvolume_interior9_5(n)*velocitymagnitude_interior9_5(n);
denom=denom+cellvolume_interior9_5(n);
end
Av_in9_5=num/denom;

num=0;

```

```

denom=0;
for n=1:length(xcoord_interior0)
num=num+cellvolume_interior0(n)*velocitymagnitude_interior0(n);
denom=denom+cellvolume_interior0(n);
end
Av_in0=num/denom;

%Sacamos el valor de velocidad para el tubo exterior
num=0;
denom=0;
for n=1:length(xcoord_exterior10)
num=num+cellvolume_exterior10(n)*velocitymagnitude_exterior10(n);
denom=denom+cellvolume_exterior10(n);
end
Av_out10=num/denom;

num=0;
denom=0;
for n=1:length(xcoord_exterior9_5)
num=num+cellvolume_exterior9_5(n)*velocitymagnitude_exterior9_5(n);
denom=denom+cellvolume_exterior9_5(n);
end
Av_out9_5=num/denom;

num=0;
denom=0;
for n=1:length(xcoord_exterior0)
num=num+cellvolume_exterior0(n)*velocitymagnitude_exterior0(n);
denom=denom+cellvolume_exterior0(n);
end
Av_out0=num/denom;

vmax10=max(Av_in10,Av_out10);
vmax9_5=max(Av_in9_5,Av_out9_5);
vmax0=max(Av_in0,Av_out0);

```

%% DENSIDAD DEL FLUIDO % OBTENCIÓN DEL VALOR DE LA DENSIDAD DEL FLUIDO

```

%En la matriz existe la densidad del fluido y la densidad del tubo sólido
%por lo que únicamente interesa el valor del fluido
ro_1=unique(density);
ro=max(ro_1);

```

%% PÉRDIDAS SECUNDARIAS % OBTENCIÓN DE LAS PÉRDIDAS SECUNDARIAS DEL TUBO

```

k10=(AP10*2)/(ro*vmax10^2);

```




```
k9_5=(AP9_5*2)/(ro*vmax9_5^2);  
k8=(AP0*2)/(ro*vmax0^2);
```

```
end
```

Anexo V Comprobación de la correcta resolución del código Matlab

Una vez realizadas todas las simulaciones en Ansys Fluent, se van a exportar los datos obtenidos a Matlab, a partir del cual se han creado las diversas gráficas comparativas.

Los datos exportados desde Fluent son los siguientes:

- Static Pressure
- Pressure Coefficient
- Dynamic Pressure
- Absolute Pressure
- Total Pressure
- Relative Total Pressure
- Density
- Density All
- Velocity Magnitude
- X Velocity
- Y Velocity
- Cell Volume

No todos los datos exportados van a ser utilizados, no obstante, para estudios posteriores pudieran ser de utilidad.

Estos datos al exportarlos en Matlab generan una matriz de datos donde cada columna es uno de estos datos, además se añaden tres columnas adicionales:

- Position
- X-Coord
- Y-Coord

Primeramente se comprueba si, en función del capuchón que se estudia, los vectores X-Coord e Y-Coord generan dicho modelo, es decir, a partir de dichos datos Matlab genera una representación de dicho modelo.

Las zonas que no se ven coloreadas es debido a que el análisis no ha podido tomar correctamente dichos datos. Como se puede observar, al tratarse de un tubo de 10 metros y un capuchón que apenas llega a 22.3 milímetros, a una escala alejada los datos que se obtienen parecen iguales unos a otros, no obstante, al ampliar la escala en la zona del capuchón se observa la diferencia existente.

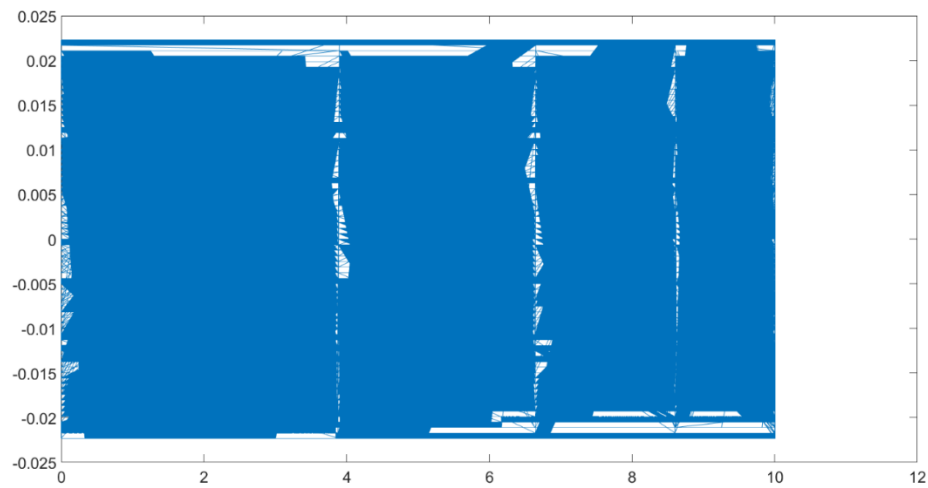


Fig. 95: Comprobación de la obtención de datos para un capuchón plano de Excentricidad 0 y separación 5.6mm.

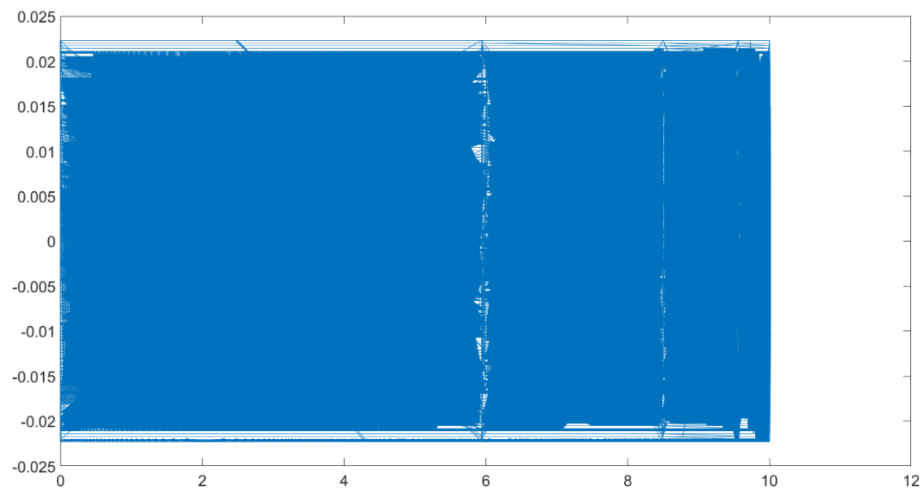


Fig. 96: Comprobación de la obtención de datos para un capuchón con bifurcación de Excentricidad 0.4 y separación 22.3mm.

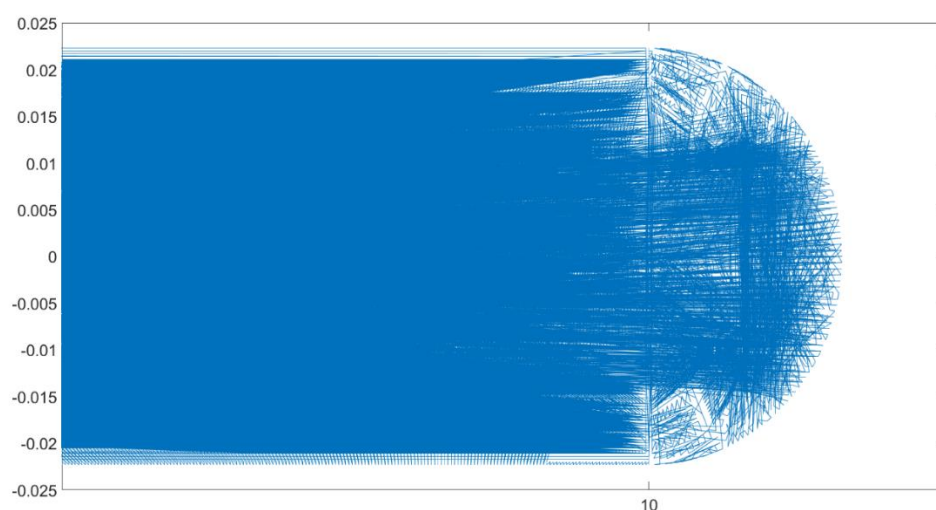


Fig. 97: Comprobación más detallada de la obtención de datos para un capuchón con bifurcación de Excentricidad 0.4 y separación 22.3mm.

Una vez comprobado que cada modelo se genera correctamente se pasa a analizar si los vectores de datos tienen bien restringidas las zonas en función de si se trata de un modelo con excentricidad 0; 0.25 o 0.4 (Ver Anexo V). La zona delimitada en color verde indica por donde pasa el fluido, y la parte marcada con color rojo establece las zonas sólidas del tubo-bayoneta.

Una vez se comprueba la veracidad del código se procede a extraer las gráficas comparativas en la zona límite del tubo bayoneta, es decir, para una distancia en el eje X de diez metros.

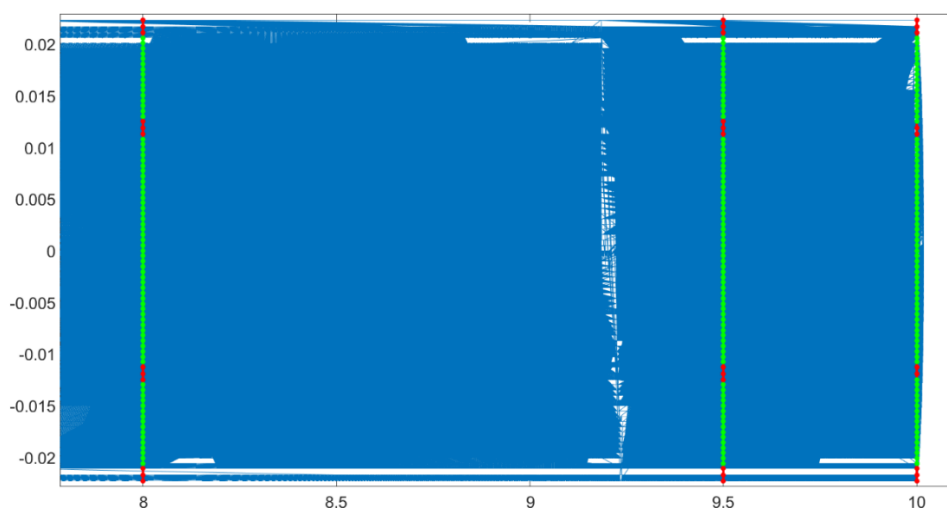


Fig. 98: Comprobación de la división de zonas para un capuchón semicircular de Excentricidad 0 y separación 16.8mm.

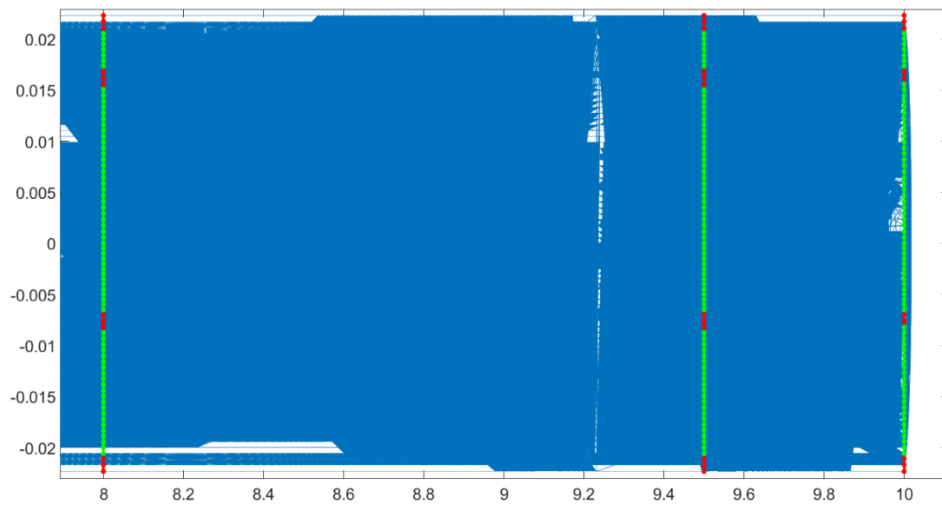


Fig. 99: Comprobación de la división de zonas para un capuchón semicircular de Excentricidad 0.25 y separación 16.8mm.

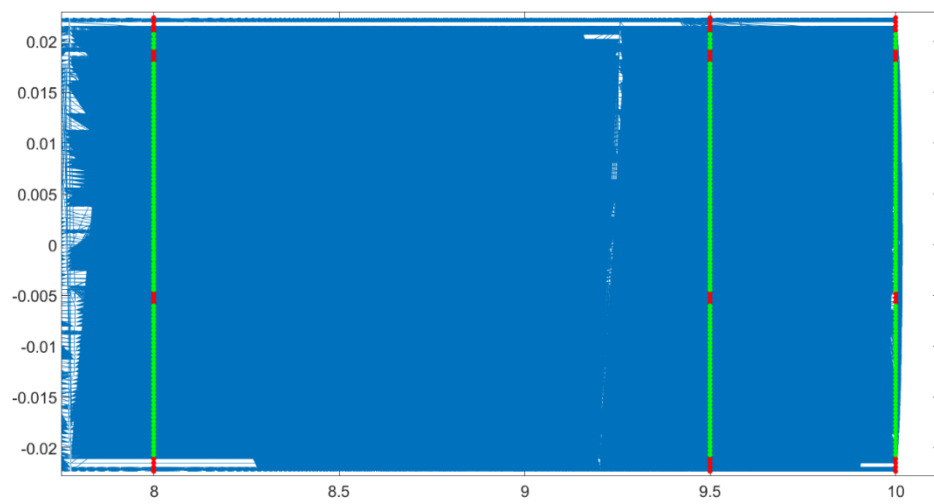


Fig. 100: Comprobación de la división de zonas para un capuchón semicircular de Excentricidad 0.4 y separación 16.8mm.



Anexo VI Código Matlab para la obtención de las gráficas de resultados

```
clear all
close all
Untitled3
plot(xcoord,ycoord)
hold on
plot(xcoord10,ycoord10,'r*-', 'Linewidth',3)
plot(xcoord9_5,ycoord9_5,'r*-', 'Linewidth',3)
plot(xcoord8,ycoord8,'r*-', 'Linewidth',3)
plot(xcoord_interior10,ycoord_interior10,'g*-', 'Linewidth',3)
plot(xcoord_interior9_5,ycoord_interior9_5,'g*-', 'Linewidth',3)
plot(xcoord_interior8,ycoord_interior8,'g*-', 'Linewidth',3)
plot(xcoord_exterior10sup,ycoord_exterior10sup,'g*-', 'Linewidth',3)
plot(xcoord_exterior9_5sup,ycoord_exterior9_5sup,'g*-', 'Linewidth',3)
plot(xcoord_exterior8sup,ycoord_exterior8sup,'g*-', 'Linewidth',3)
plot(xcoord_exterior10inf,ycoord_exterior10inf,'g*-', 'Linewidth',3)
plot(xcoord_exterior9_5inf,ycoord_exterior9_5inf,'g*-', 'Linewidth',3)
plot(xcoord_exterior8inf,ycoord_exterior8inf,'g*-', 'Linewidth',3)
```